

Ai miei *genitori* e a mio fratello *Daniel*  
le mie certezze

† A *Matteo*  
la cui mancanza non sarà mai colmata.



**UNIVERSITÀ DI PISA**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE**

**A.A.**

**TESI DI LAUREA**

**LA FITODISIDRATAZIONE DEI FANGHI: STUDIO CONCETTUALE ED  
ANALISI SPERIMENTALE.**

***CANDIDATO: MONICA D'ONOFRIO***

***RELATORI: PROF. ING. RENATO IANNELLI***  
***PROF. ING. VALERIO MILANO***  
***ING. DAVID GIRALDI***

# Indice

<i>Indice</i> .....	2
<i>Indice delle figure</i> .....	4
<i>Introduzione</i> .....	5
<i>Capitolo 1-Aspetti normativi</i> .....	7
1.1 Normativa internazionale (Direttiva Europea 86/278/CEE).....	7
1.2 Normativa nazionale D. Lgs 99/01/92.....	10
<i>Capitolo 2-La fitomineralizzazione</i> .....	13
2.1 Descrizione del processo .....	13
2.2 Impianto tipo .....	14
2.3 Fasi operative e vita utile dell'impianto .....	17
2.4 Parametri di progetto .....	19
2.5 Cicli di carico/ riposo .....	24
2.6 Analisi dell'evapotraspirazione .....	25
2.7 Percentuale di secco .....	26
2.8 Influenza diretta del clima .....	27
<i>Capitolo 3-Descrizione impianto sperimentale</i> .....	32
3.1 Descrizione dell'impianto analizzato.....	32
3.3 Descrizione della sperimentazione.....	37
3.4 Materiali utilizzati.....	40
3.5 Procedura e metodo impiegati .....	42
3.6 Altri parametri monitorati.....	47
3.6.1 Indice di area fogliare L.A.I.....	47
3.6.1.1. Metodo di misura adottato .....	48
3.6.2.Evapotraspirazione .....	51
<i>Capitolo 4-Equazione WC/t</i> .....	52
4.1 Modellazione.....	52
4.2 Analisi dei risultati ottenuti.....	54
4.3 Analisi dei dati raccolti.....	57
4.3.1 Equazione misurazione invernale.....	57
4.3.2 Equazione misurazione estiva.....	59
4.3.3 Confronti tra le due equazioni .....	61
4.4 Elementi progettuali .....	63
4.5.Analisi dei costi.....	66
<i>Capitolo 5-Esperienza progettuale con Acque Spa</i> .....	68
5.1 Determinazione dei siti .....	70
5.2 Fasi costruttive .....	72
5.2.1.Pulizia letti .....	72
5.2.2.Opere murarie .....	73
5.2.3.Scelta dello strato drenante.....	75
5.2.4.Opere di piping e piantumazione.....	75
5.2.5.Messa in esercizio .....	76
5.3. Osservazione.....	78
<i>Capitolo 6-Conclusioni e prospettive future</i> .....	79
<i>Bibliografia</i> .....	81

<i>Allegato A-equazione WC/t analisi statistica .....</i>	<i>84</i>
<i>Allegato B-Elaborazioni costi/superficie.....</i>	<i>92</i>
<i>Ringraziamenti .....</i>	<i>99</i>

## Indice delle figure

Figura 1-Stratigrafia di un impianto tipo.	15
Figura 2-Pragmites Australis.	17
Figura 3-Messa in esercizio.	18
Figura 4-Primo carico.	18
Figura 5-Messa a regime-situazione di pieno sviluppo.	19
Figura 6-Vista del depuratore La Fontina.	32
Figura 7-Planimetria depuratore La Fontina.	33
Figura 8-Letti di essiccamento: vista d'insieme	36
Figura 9-Sistema di alimentazione.	36
Figura 10-Medium vasca piantumata.	37
Figura 11-Medium vasca non piantumata	37
Figura 12-Situazione vegetativa periodo estivo	39
Figura 13-Situazione vegetativa periodo invernale.	39
Figura 14-Fustella per campionamento (Eijkamp-The Netherlands)	40
Figura 15-Contenitore resistente a temperature di 105°	41
Figura 16-Bilancia di precisione.	41
Figura 17-Essiccatore.	41
Figura 18-Pluviometro.	42
Figura 19-Modalità di capionamento vasca piantumata.	43
Figura 20-Modalità di campionamento vasca non piantumata.	43
Figura 21-Punti di prelievo e particolare di campionamento letto piantumato	44
Figura 22-Punti di prelievo e particolare di campionamento letto non piantumato.	44
Figura 23-Piante di riferimento.	48
Figura 24-Misurazione area fogliare	49
Figura 25-Calcolo delle aree di riferimento per mezzo di un foglio Autocad.	50
Figura 26-Misurazione internodo	50
Figura 27-Pozzetto di uscita letto di fitomineralizzazione nel giorno di caricamento dei fanghi.	53
Figura 28 Diagramma con riportate le misure ricavate dalla campagna dati.	55
Figura 29-Condizione letto non piantumato periodo invernale	56
Figura 30-Confronto tra i dati misurati nel L.P. e nel L.N.P.	56
Figura 31-Dati campagna invernale.	57
Figura 32-Equazione stimata/ dati misurati.	58
Figura 33-Intervallo d'errore tra dati stimati e misurati.	59
Figura 34.-Dati campagna estiva	59
Figura 35-Equazione stimata/dati misurati.	60
Figura 36-Intervallo d'errore tra dati stimati e misurati.	61
Figura 37-Equazioni stimate e dati a confronto.	62
Figura 38-Curve tra cicli di carico, vita utile stimata e superfici necessarie.	65
Figura 39-Curve dei costi in funzione del tempo.	67
Figura 40-Presenza d'insetti nelle vasche piantumata.	69
Figura 41-Condizione iniziale dei letti	73
Figura 42-Condizione muratura prima ristrutturazione	74
Figura 43-Condizioni muratura a ristrutturazione avvenuta	74
Figura 44-Portellone zincato.	74
Figura 45-Medium letto ristrutturato	75
Figura 46-Sistema distribuzione fango prima dell'intervento di ristrutturazione	76
Figura 47-Sistema di distribuzione fango a ristrutturazione avvenuta	76
Figura 48-Piantumazione e periodo iniziale di caricamento.	77

## Introduzione

La fitomineralizzazione (o fitoessiccamento) dei fanghi biologici consiste nella disidratazione e nella stabilizzazione dei fanghi in vasche o bacini impermeabilizzati dotati di sistema di drenaggio, raccolta delle acque ed essenze vegetali.

I letti di fitodisidratazione rappresentano una scelta progettuale ottimale per poter garantire buoni risultati di disidratazione e mineralizzazione dei fanghi e allo stesso tempo consentire di contenere i costi di smaltimento e quelli di gestione.

Per la loro realizzazione è sufficiente disporre di vasche opportunamente impermeabilizzate, sulle quali distribuire il fango in strati più uniformi possibili in modo da permettere la percolazione delle acque e l'ispessimento dei fanghi.

Le acque di percolazione, altamente inquinate, sono ritratte all'interno dell'impianto di depurazione.

Il sistema di drenaggio è costituito, in genere, da un substrato formato da due-tre livelli di ghiaia avente granulometria che aumenta di dimensioni dalla superficie al fondo della vasca.

L'essenza più comunemente utilizzata è la macrofite ed in particolare la *Phragmites Australis* il cui rizoma è piantato nello strato drenante più superficiale.

Le caratteristiche strutturali di questo tipo di sistema non si discosta molto dai tradizionali letti d'essiccamento, ma i processi di disidratazione e di mineralizzazione sono fortemente migliorati, grazie alla presenza delle piante che, non solo incrementano l'assorbimento del materiale organico, ma generano tutto un insieme di fattori chimico-fisico che migliorano le condizioni depurative.

Si ricordi a tal proposito la presenza di:

- Un fitto sistema radicale che mantiene ben areato il substrato di fango
- Una serie di microrganismi che vivono in simbiosi agli apparati radicali e che producono un effetto importante per il processo di mineralizzazione.
- Un effetto dinamico legato alle condizioni meteo-climatiche e alle piante che muovendosi contribuiscono ad ossigenare gli strati di fango inferiori e impediscono la formazione di una crosta superficiale che può produrre la formazione di zone anaerobiche molto deleterie.
- Una gestione dell'impianto più semplice non dovendo svuotare e portare in discarica il fango trattato cosa invece necessaria per i tradizionali letti.

Questo studio mira ad analizzare gli effetti dinamici del contenuto d'acqua presente nel fango nel breve periodo, intendendo con esso, l'intervallo tra due successivi sversamenti di fango nei letti.

In seguito, sulla base delle misurazioni effettuate giornalmente, il lavoro si propone di determinare e calibrare un'equazione che possa descrivere il processo di disidratazione e che al contempo rappresenti uno strumento analitico utile sia dal punto di vista progettuale che di analisi benefici/costi per la realizzazione di impianti di fitomineralizzazione.

Altro obiettivo è evidenziare il differente comportamento tra letti dotati di piante e letti tradizionali, ponendo particolare attenzione alla scelta del substrato drenante e al differente comportamento dinamico nel breve periodo.

In ultimo, in collaborazione con la società ACQUE spa ed ACQUE SERVIZI srl è stato fornito un supporto tecnico ingegneristico per trasformare i vecchi letti d'essiccamento in sistemi di fitodisidratazione. Tali letti, che giacevano inutilizzate perché insufficienti a sopperire all'aumento di fango prodotto sono sembrati una possibile risorsa alla riduzione dei costi una volta convertiti.

L'interesse di tale operazione per una società come Acque si deve alla crescente esigenza di trovare nuove tecnologie e soluzioni per risolvere le problematiche connesse allo smaltimento dei fanghi, quali onerosi costi di gestione, elevato impatto ambientale ecc., e alla eventuale possibilità di utilizzare il materiale ottenuto, all'interno della agricoltura come matrice idonea alla preparazione del compost.

Per quest'ultimo aspetto, connesso a quella che viene definita "chiusura del ciclo", si fa presente che con le nuove direttive sia a livello comunitario Direttiva 86/278/CEE che a livello nazionale D.Lgs 99 del 27/01/1992. la necessità di ottenere una qualità del fango sempre migliore, da poter riutilizzare in agricoltura, si è fatta sempre più importante e l'utilizzo di sistemi di fitomineralizzazione sembra fornire un buon strumento per fronteggiare questa crescente necessità.

Intendiamo con chiusura del ciclo la possibilità di eliminare le esternalità, facendo in modo di poter trattare e riutilizzare quanto ottenuto.

## ***Capitolo 1-Aspetti normativi***

Le problematiche connesse al trattamento e smaltimento dei fanghi rappresentano oggi un nodo sempre più spinoso da risolvere sia sul piano nazionale sia su quello internazionale.

Ad oggi tanto la giurisprudenza nazionale quanto quell'internazionale si mostrano insufficienti nel fornire linee guide al trattamento e smaltimento dei fanghi di depurazione. Su tale argomento si annoverano solo la Direttiva 86/278/CEE per l'uso dei fanghi in agricoltura recepita dalla nostra normativa con il D.Lgs 99 del 27/01/1992.

### **1.1 Normativa internazionale (Direttiva Europea 86/278/CEE)**

L'uso dei fanghi in agricoltura è una pratica utilizzata ampiamente per cui le norme che tentano di disciplinarlo risultano molteplici. Tra queste però esiste un fattore di condivisione ed unione ed è l'attenzione rivolta alla tutela dell'ambiente che pone dei limiti soprattutto sulla presenza nei fanghi di metalli

Oggi l'attenzione per la tutela dell'ambiente ha portato ad inserire limitazioni anche rispetto a quelli che sono ritenuti inquinanti organici e microbiologici ed anche a limitazioni sensibili sull'apporto d'azoto nei suoli.

È su tale base che nasce la Direttiva comunitaria 86/278 che ha l'intento di consentire l'utilizzazione agronomica dei fanghi senza rischio per la salute dell'uomo e degli animali e nel rispetto più completo del suolo e sottosuolo.

In essa si fissano alcune linee guida come:

- Concentrazione ammissibile d'alcuni metalli pesanti *Art.4 e allegati I A. IB. IC* si riporta sotto un esempio della tipologia d'allegato di cui parliamo. *Tabella 1.*



Parametri	Valori limite
Cadmio	da 1 a 3
*Rame	da 150 a 140
*Nichel	da 30 a 75
Piombo	da 50 a 300
Zinco	da 150 a 300
Mercurio	da 1 a 1,5
**Cromo	-

**Tabella 1-Parametri normativi sulle concentrazioni ammissibili di metalli nei fanghi.**

\* Gli stati della comunità europea possono superare i valori limite sopra riportati in presenza di suoli con Ph costantemente superiore a 7.

\*\* non si hanno ancora ad oggi valori guida a cui attenersi.

➤ Qualità dei fanghi che vengono utilizzati *Art 6 e allegato IIA.*

Nell'allegato si riportano tutte le analisi che è necessario fare almeno ogni sei mesi per testare la qualità del fango tra i parametri monitorati si hanno:

- PH
- Azoto e fosforo
- Cadmio rame nichel piombo zinco mercurio cromo
- Sostanza secca/ sostanza organica.
- Valori massimi di salmonella.

➤ Analisi dei suoli. *Art.9 e allegato IIB.*

Anche per i terreni sono previste analisi di:

- PH
- Cadmio rame nichel piombo zinco mercurio cromo.

➤ Quantità massime di fanghi che possono essere applicate sui suoli. *Art 10.*

Sempre all'interno di questa direttiva sono riportate tutta una serie di divieti e di avvertenze tra cui.

- ~ Sui pascoli o sulle culture foraggiere non utilizzare prima che sia trascorso un periodo di almeno tre settimane.
- ~ Non spanderli sui terreni coltivati a frutti o destinati all'agricoltura durante il periodo vegetativo.

- ~ Sui suoli coltivati con vegetali che in genere si consumano crudi non spandere i fanghi nei dieci mesi precedenti al raccolto.
- ~ L'utilizzo non deve compromettere né la qualità del suolo né le acque superficiali o profonde.
- ~ Quando i suoli presentano Ph inferiore a 6, è a carico dei singoli stati decidere di adottare gli accorgimenti normativi più adeguati.

Ad oggi la Commissione Ambiente dell'Unione Europea sta elaborando una nuova direttiva che pone particolare attenzione agli aspetti microbiologici e sui microinquinanti organici.

Nel documento bozza <sup>Φ</sup>(CEE,2000) sono contenute sostanziali differenze rispetto alle norme vigenti. Il rischio non viene oggettivamente calcolato ma si continuano a imporre limiti e limitazioni in modo da ridurre l'impatto nella sua totalità.

I fanghi devono essere poi impiegati ed utilizzati in base al tipo di impiego dei suoli..

Sempre in questa direttiva (CEE,2000) si danno anche indicazioni dei possibili trattamenti avanzati e convenzionali a cui sottoporre i fanghi per consentire i diversi usi tra cui:

- Stabilizzazione aerobica termofila in batch ad una temperatura di almeno 55°C per almeno 20h.
- Condizionamento con calce mantenendo un pH 12 per almeno tre mesi.
- Stabilizzazione anaerobica termofila in batch ad una temperatura di almeno 53°C per almeno 20h.
- Aerazione prolungata in batch a temperatura ambiente, per un periodo stabilito dalle competenti autorità in funzione delle condizioni climatiche.
- Ecc..

Si noti che la maggioranza dei trattamenti avanzati proposti non sono ancora presenti nella realtà italiana dove prevalgono i metodi tradizionali, che comunque in base alle indicazioni tecniche previste potranno determinare la necessità di adeguare la maggioranza dei nostri impianti.

Per quanto riguarda il contenuto di inquinanti si indicano anche in questa direttiva i limiti da rispettare sia sui suoli sia nei fanghi.

I limiti proposti sono in linea con quelli dell'attuale direttiva, sostanziale differenza è l'introduzione di restrizioni anche sul fosforo.

Il fatto che tale direttiva sia ad oggi ancora una bozza, pone in evidenza come questo tema sia di difficile trattamento.

---

<sup>Φ</sup> Working document on sludge 3rd draft ENV.E.3/LM. 27/04/2000

## 1.2 Normativa nazionale D. Lgs 99/01/92

Questo decreto nasce come attuazione della Direttiva Europea 86/278/CEE inerente la protezione del suolo nell'utilizzazione dei fanghi di depurazione in agricoltura di cui abbiamo dato cenno nel paragrafo precede.

Tra i vari articoli *Art 3* stabilisce che :

per poter utilizzare i fanghi, la cui definizione è anch'essa contenuta nella direttiva, è necessario:

- ~ I fanghi siano stati sottoposti a trattamento.
- ~ Siano idonei per essere utilizzati come ammendante e/o fertilizzante per il terreno.
- ~ Non contengano sostanze dannose alla salute dell'uomo, degli animali e non danneggino l'ambiente.

Anche la nostra Normativa, come la Direttiva Europea, stabilisce dei limiti sulla presenza di alcuni elementi chimici altamente nocivi sia all'interno dei fanghi che del suolo.  
(Tabella 2)

<i>Parametri</i>	<i>Valori limite nei suoli (mg/kgSS)</i>	<i>Valori limite nei fanghi (mg/kgSS)</i>
<i>Cadmio</i>	1/3	20/40
<i>Rame</i>	50/140	1000/1750
<i>Nichel</i>	30/75	300/400
<i>Piombo</i>	50/300	750/1200
<i>Zinco</i>	150/300	2500/4000
<i>Mercurio</i>	1/1,5	16/25
<i>Cromo</i>	(100)/(200)	(1000)/(1750)

**Tabella 2-valori minimi e massimi presenti nei suoli e nei fanghi da rispettare secondo normativa**

Nell'*Art.4* vengono invece riportati dei veri e propri divieti tra cui:

- ~ l'utilizzo dei fanghi in terreni soggetti ad allagamento, esondazione ,acquittrini o con falde acquifere affioranti.

- ~ Su pendii maggiori del 15%
- ~ Su terreni con PH minori di 5
- ~ Utilizzo di fanghi liquidi per irrigare i campi

Dall'*Articolo 5* invece si aprono tutta una serie di attività rivolte per prima allo Stato poi alle Regioni e per concludere alle Province.

Tra le competenze dello Stato ed in particolare del Ministero dell'agricoltura e dell'industria si annota la necessità di adempiere, nei tempi richiesti, alle direttive emanate dalla Comunità Europea e di organizzare la raccolta di dati sui fanghi e sul suolo fornendo e definendo anche le metodiche legate al campionamento.

Molto più incisive sono invece le competenze a carico delle Regioni tra cui come possiamo ricavare dall'*Art. 6*:

- ▶ Rilasciano le autorizzazioni per raccolta, trasporto, stoccaggio e tutto ciò che è connesso alle attività inerenti i fanghi di depurazione.
- ▶ Stabiliscono eventuali ulteriori limiti legati sia ai suoli che alla qualità dei fanghi.
- ▶ Stabiliscono distanze di rispetto per l'applicazione dei fanghi dai centri abitati, pozzi di captazione, corsi d'acqua e tutto ciò che può risultare un vincolo ambientale.
- ▶ Predispongono piani d'utilizzazione agricola dei fanghi tenendo conto della loro natura, delle caratteristiche del suolo e del tipo di coltura che stiamo valutando.
- ▶ Stabiliscono norme igienico sanitarie per il personale che viene a contatto con i fanghi di depurazione.

Ciascuno di tali trafiletti è poi articolato in più punti della normativa.

In ultimo le Province hanno il compito di controllare tutte quelle attività come raccolta stoccaggio e quant'altro ruoti attorno ai fanghi.

Si fa infine notare che la direttiva europea CEE 2000 ad oggi, come detto ancora in fase embrionale, oltre a inasprire i parametri legati alla qualità danno indicazioni sul tipo di trattamenti innovativi da utilizzare per garantire un risultato finale di buona qualità.

Questo a livello italiano rappresenta un difficile elemento da superare tenendo conto che nella nostra realtà la maggior parte dei depuratori è dotato per il trattamento della disidratazione di metodi tradizionali che andrebbero sostituiti con un costi spesso insostenibili per i piccoli depuratori.

È anche nell'ottica di questo possibile panorama futuro che possiamo inserire le nostre sperimentazioni legate alla *Fitomineralizzazione*.

## ***Capitolo 2-La fitomineralizzazione***

Dopo i primi esperimenti negli anni '60, l'interesse per il processo di fitomineralizzazione si è ridestato grazie ai buoni risultati conseguiti da Nielsen in Danimarca (1990), Liénard in Francia (1990) e Kim in America (1997) che hanno evidenziato come questo tipo d'impianto non solo assicuri buoni risultati dal punto di vista disidratativo, ma consenta anche un notevole risparmio economico, aspetto non trascurabile visto il crescente aumento di fanghi da smaltire. L'utilizzo del sistema a "ciclo chiuso" da, inoltre, come risultato finale un ottimo ammendante da impiegare in agricoltura.

Tale tecnica di trattamento trova favorevole applicazione soprattutto per le piccole comunità anche se ritroviamo esperienze a realtà grosse fino a 30000 AE (Nielsen, 2003).

### **2.1 Descrizione del processo**

La fitomineralizzazione dei fanghi biologici è un trattamento relativamente recente: fu utilizzato per la prima volta in Germania, alla fine degli anni sessanta.

Questo consiste nell'essiccamento e nella digestione del fango, per opera delle piante, in apposite vasche impermeabilizzate dotate di un sistema di raccolta del percolato e di un substrato granulare di pezzatura crescente verso il basso, all'interno del quale si sviluppa una fitta rete radicale.

La stabilizzazione dei fanghi avviene per mezzo della simultanea presenza di processi fisici, chimici e biologici innescati direttamente dall'apparato vegetale e/o per opera dei batteri che si sviluppano sui loro apparati radicali e rizomatosi o nell'ecosistema in cui vivono.

La disidratazione dei fanghi in questi tipi d'impianto può imputarsi alla concomitanza di tre processi:

- l'evapotraspirazione
- la percolazione
- la mineralizzazione.

Il primo fattore è strettamente legato allo sviluppo vegetativo e quindi alla capacità delle piante di assorbire e far evaporare l'acqua ancora presente. Si è riscontrato che la rete di rizomi che possono svilupparsi all'interno del fango è in grado di raggiungere una capacità di suzione pari, e a volte superiore, alle 16 atm, raddoppiando il potere d'evaporazione di un letto d'essiccamento privo di vegetali (Garuti, 2003).

La percolazione avviene soprattutto nei primi giorni dopo l'immissione del fango e dipende dalla capacità filtrante del substrato; anche in questo caso l'essenza vegetale ha un ruolo attivo, poiché la fitta maglia di radici crea un sottofondo poroso che facilita e velocizza il movimento dell'acqua verso il basso, dove è raccolta e, in genere, rinviata in testa all'impianto di depurazione.

Infine i fattori da cui dipende la mineralizzazione sono la diffusione d'ossigeno all'interno del fango e il tempo di permanenza dello stesso nella vasca. In questo caso il contributo delle piante è legato sia all'effetto meccanico dei rizomi e delle stesse canne, che rompono la crosta superficiale creando dei cunicoli in cui s'insinua l'aria, sia dalla presenza di batteri sull'apparato radicale stesso.

## **2.2 Impianto tipo**

Le caratteristiche strutturali di questo tipo d'impianto non si scostano molto dai comuni letti d'essiccamento e comprendono:

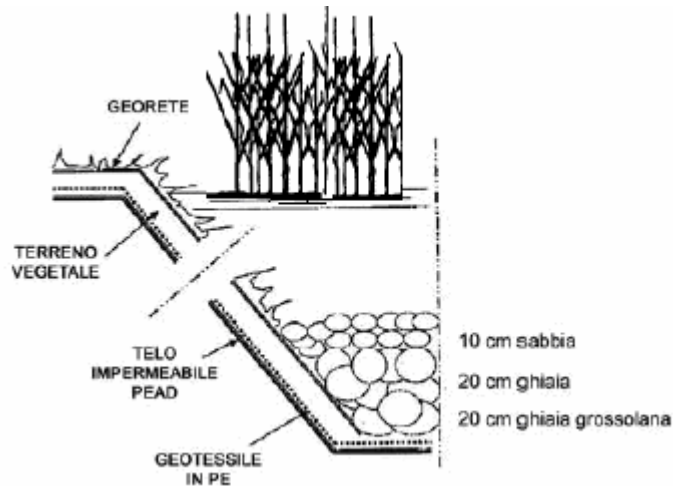
- Sistema di raccolta del percolato.
- Filtro drenante piantumato.
- Sistema di distribuzione del fango.

Le dimensioni delle vasche variano con la quantità di fango da trattare e le essenze vegetali scelte sono piante acquatiche in grado di sopravvivere in ambienti ostili.

La stratigrafia del letto prevede sul fondo il posizionamento di una membrana impermeabile, in genere geotessile in PE, sulla quale sono sistemati dei tubi di drenaggio con diametro non inferiore agli 80-100 mm, che hanno il doppio compito di raccogliere il percolato e di aerare lo strato sottostante.

Tali tubazioni sono annegate in uno strato di 25-30 cm di ghiaia (20 mm) su cui è steso un piano di 10-15 cm di materiale con granulometria intermedia come ghiaietto

(10-15 mm) ed infine uno strato superiore di sabbia grossa (0,5-1 mm) come mostrato in *figura 1*



**Figura 1-Stratigrafia di un impianto tipo.**

In letteratura si attesta che il numero di strati filtranti e il tipo di granulometria prescelta sono parametri molto variabile divenendo delle vere e proprie scelte progettuali come mostrato in *Tabella 7*.

Sopra il filtro viene distribuito del fango in strati non troppo spessi e ad elevata umidità, questo per favorire l'omogenea distribuzione su tutto il letto ed evitare zone inferiori eccessivamente umide che richiederebbe tempi troppo lunghi per asciugarsi, e per impedire la formazione di zone anossiche che porterebbero ad un mal funzionamento dell'impianto stesso.

La scelta del medium è un aspetto delicato e da non sottovalutare, infatti una cattiva connessione capillare tra due strati adiacenti ed in special modo tra lo strato superiore ed il fango può dar vita al fenomeno conosciuto come "handing water": la pressione dell'acqua in discesa è superata dalla resistenza causata dalla mancanza di connessione capillare che porta alla formazione di uno strato liquido che inbisce la vegetazione e fa perire le essenze già presenti.(Nielsen, 2005).

Tra la sommità del filtro ed il bordo della vasca è richiesto un franco di circa 1-1,5 m, per garantire tempi di funzionamento ed accumulo del fango non inferiori agli 8-



10 anni. Secondo Nielsen (2003) la profondità dei letti non deve scendere al di sotto di 1,70-1,80 m di cui almeno 1,50-1,60 da ritenersi di bordo libero.

Si fa presente che questi tipi di impianto sono stati adoperati con successo anche per il trattamento di fanghi chimici o altamente inquinati come i sedimenti di dragaggio (De Maeseneer, 1997); in tal caso si utilizzano solo dei serbatoi perfettamente impermeabilizzate in modo da impedire la percolazione e consentire la disidratazione attraverso i processi di evapotraspirazione e mineralizzazione.

La pianta più comunemente usata per il processi di fitodisidartazione è la *Phragmites Australis* (figura 2) per le seguenti caratteristiche:

- possiede fusti robusti ed alti (fino a 3 metri d'altezza);
- resiste alle stagioni fredde formando una copertura compatta;
- penetra in profondità nel terreno;
- l'apparato radicale è robusto;
- i parenchimi aeriferi sono molto sviluppati perciò l'ossigeno si trasferisce dalle foglie alle radici;
- l'esistenza di un flusso convettivo indotto, determinato dalla differenza di velocità del vento tra la parte alta e quella bassa della pianta, richiama ossigeno dalle foglie ai rizomi;
- è una pianta autoctona: il clima del nostro territorio permette alla *Phragmites Australis* di nascere spontaneamente per cui non introduciamo nuove specie vegetali che potrebbero proliferare a scapito di altre piante.

Le piante richiedono poca manutenzione, concentrata soprattutto in primavera: bisogna rimuovere la biomassa prodotta o mettere a fuoco controllato le parti secche, facendo attenzione a non danneggiare i rizomi sottostanti.

In generale i rizomi delle essenze vegetali sono piantumati nel filtro drenante. Le *Phragmites* adoperate sono state precedentemente fatte crescere in serra in modo da trapiantare un'essenza già sufficientemente cresciuta in grado di attecchire e svilupparsi rapidamente; è opportuno posizionare una pianta ad almeno mezzo metro dall'altra (Masciandaro, 2006).



**Figura 2-Phragmites Australis.**

L' impianto è completato da un sistema di distribuzione del fango scelto in funzione del tipo di liquame da trattare e dalle dimensioni delle vasca. È consigliabile una portata di fango tale che la velocità in condotta risulti almeno pari a 0,15 m/h. (Nielsen,1990): velocità inferiori possono dar luogo a sedimentazione del fango con conseguente intasamento del sistema di distribuzione.

### **2.3 Fasi operative e vita utile dell'impianto**

La vita utile del sistema può essere suddivisa in quattro fasi operative così riassunte:

1. messa in esercizio
2. funzionamento a regime
3. svuotamento
4. rifondazione del sistema.

#### **Messa in esercizio**

Il primo periodo comprende in genere un ciclo di due anni nel quale s'interrano le piante aspettando il loro sviluppo vegetativo.

A piantumazione avvenuta le *Phragmites* vengono innaffiate con acqua pulita; quando l'essenza si è ben radicata, s'impiega, per scopi irrigui, la stessa acqua di scarico molto ricca in nutrienti.

Al fine di consentire un buon accrescimento, sia verticalmente sia orizzontalmente delle piante, il caricamento del fango avviene 1-2 mesi dopo la piantumazione ed in quantità ridotta rispetto al funzionamento a pieno carico (*figura 3-4*). Le canne in questo modo non rischiano di venir sommerse, ma riescono ad ambientarsi bene e a fornire una buona copertura su tutta la vasca.



**Figura 3-Messa in esercizio.**



**Figura 4-Primo carico.**

### Funzionamento a regime

Dal secondo anno il sistema raggiunge le condizioni di regime e può lavorare a pieno carico per un periodo approssimativo di dieci anni.

Il funzionamento a regime è caratterizzato da un alternarsi di cicli di carico e riposo: in questo modo si consente alle piante di procedere alla disidratazione ed alla mineralizzazione del fango. (*Tabella 7*)

Si fa presente, che maggiore è il periodo d'interruzione migliori effetti si ottengono dai processi di disidratazione e di mineralizzazione; di contro, si ha necessità di un maggior numero di vasche e di volumi (*figura 5*).



**Figura 5-Messa a regime-situazione di pieno sviluppo.**

### Svuotamento

Dall'inizio dell'ottavo anno si dà il via all'operazione di svuotamento; questa consiste nel sospendere l'alimentazione del letto per un periodo che può variare tra i sei mesi un anno (Nielsen, 2003), periodo necessario per consentire al fango presente nella vasca di completare il processo di fitodisidratazione. Anche questa scelta risulta un parametro progettuale e come tale può differenziarsi da autore ad autore come illustrato nella *Tabella 7*.

### Reimpianto del sistema

L'ultima fase prevede lo smantellamento dei letti con rimozione oltre che del liquame e delle piante anche del filtro drenante.

Si provvede successivamente ad una ricostruzione ex-novo dell'impianto di fitodisidratazione.

Il fango estratto unito alle canne triturate può costituire un ottimo ammendante per l'agricoltura purché siano rispettati i limiti di legge imposti dal D.lgs 99/92.

## **2.4 Parametri di progetto**

Il dimensionamento e la scelta dei parametri progettuali sono funzione del:

- tipo di fango trattato dall'impianto
- quantità di fango prodotto
- qualità del fango.

### Tipo di fango

Con riguardo al tipo di fango si è osservato che un fango ben stabilizzato rispetto ad uno giovane (< 20 giorni) permette un carico a regime superiore, consentendo di ridurre notevolmente il numero dei letti; il risparmio che ne deriva è sia economico sia in termini di superfici da utilizzare (Nielsen, 2003).

Tra i vari tipi di prodotti, come già accennato in precedenza, si accertano esperienze legate a fanghi di natura differente da quella domestica, dove la funzione connessa alle piante è ancora più netta poiché il processo di disidratazione è legato solo all'evapotraspirazione, non potendo il percolato essere ritrattato per mancanza di un depuratore (De Maeseneer, 1997).

L'esperienza proposta da De Maeseneer (1997) è relativa a sedimenti di dragaggio dove la componente organica è praticamente trascurabile rispetto a quella inorganica; il fango è caratterizzato da un'alta percentuale di metalli pesanti.

L'autore ha preferito utilizzare tra l'*Helophyte* quella che meglio si adatta al fango che stava trattando ricordando che tutta questa famiglia ha tra le peculiarità quella di tollerare bene variazioni notevoli di PH e di sopravvivere in un ambiente salino.

L'esperienza condotta ha rivelato che le piante hanno la capacità di assorbire e trattenere i metalli presenti nel fango semplificando, attraverso il loro sfalcio, la rimozione di dette sostanze; riportiamo nella *Tabella 3* i risultati ottenuti:

		<b>Zn</b>	<b>Cu</b>	<b>Pb</b>	<b>Hg</b>	<b>Cd</b>
<b>pianta</b>	Valore medio	146	761	5,99	0,11	0,29
	Intervallo	83,5-220	4,95-12,7	4,65-7,7	0,08-0,17	0,23-0,34
<b>fango</b>	Valore medio	1836	215	341 *	2,79 **	11,92 ***
	Range	956-3016	130-330	137-642	1,24-4,27	6,8-16,5

**Tabella 3- Livelli di metallo (mg/kg secco) contenuti nella parte aerea di essenze impiantate in un fango di dragaggio (Maeseneer, 1997).**

Sempre con riferimento all'analisi dei metalli pesanti possiamo riportare anche l'esperienza condotta da Masciandaro *et al* (2006) e quella di Chiapella *et al* (2000) su un fango di tipo domestico. Durante la sperimentazione si è osservato come le piante hanno la capacità di mantenere basso il tenore di metalli pesanti presenti nel fango permettendo un loro possibile utilizzo in agricoltura; i valori ottenuti, infatti sono al di sotto di quanto previsto dall'attuale normativa D.Lgs 99/1992 come mostrato in *Tabella 4*:

metalli (mg/kg SS )	impiantoLa (PI)	Rotta	Impianto Toso(CN)	D.Lgs 99/1992
Pb	77,10		<80	750
Cd	21,15		<10	20
Ni	51,48		24,33	300
Zn	866,75		710,00	2500
Cu	350		246,33	1000
Hg				10
Fe	5695,25			
Cr	27,7		63,00	

**Tabella 4-Confronto tra i valori misurati nel fango tra i due diversi impianti e il D.Lgs 99/1992**

Per completezza d'informazioni riportiamo anche la concentrazione di metalli misurata nelle *Phragmites* dell'impianto La Rotta (Masciandaro *et al.*, 2006).*Tabella5*.

<i>Phragmites</i>	<b>Cu</b> (mg/kgSS)	<b>Mn</b> (mg/kgSS)	<b>Zn</b> (mg/kgSS)	<b>Fe</b> (mg/kgSS)	<b>Cr</b> (mg/kgSS)	<b>Ni</b> (mg/kgSS)	<b>Pb</b> (mg/kgSS)
Parte aerea	16,8	149	21,3	295	9,5	1,26	5,21
Parte radicale	16,3	35,5	80,0	137	4,18	16,3	0,422

**Tabella 5-Contenuto di metalli nella parte aerea e radicale nella *Phragmites* (Masciandaro *et al* , 2006 - adattata ).**

Infine, l'esperienza condotta da Kim (1997) rilevò la tendenza da parte dei metalli pesanti ad accumularsi maggiormente negli strati profondi del fango senza peraltro inficiare il loro utilizzo in agricoltura, ma al contempo mise in evidenza un'alta presenza di patogeni negli strati superficiale che in alcuni casi non rendeva possibile il loro impiego come ammendante (*Tabella 6*).

Profondità cm	coliformi mg/kg	Ar mg/ kg	Cu mg/ kg	Pb mg/ kg	Cd mg/ kg	Cr mg/ kg	Hg mg/ kg	Ml mg/ kg	Ni mg/ kg	Se mg/ kg	Zi mg/ kg
0-10	4700	<cal	200	27	<cal	12	1,8	<cal	<cal	<cal	220
10-20	270	0,31	270	33	<cal	19	1,9	<cal	8,1	<cal	290
20-30	19	0,46	370	60	<cal	24	3,0	<cal	12	<cal	570
30-40	10	0,65	490	110	<cal	35	3,8	<cal	20	<cal	540
40-50	8	0,86	490	77	<cal	36	5,6	<cal	17	<cal	600
50-71	103	<cal	630	90	8,2	48	0,14	<cal	<cal	<cal	<cal

\*Tabella 6-Concentrazione metalli in funzione della profondità (Kim, 1997).

Tutte le esperienze condotte hanno evidenziato come l'impiego di fango attivo sia quello che meglio di tutti si adatta a questo tipo d'impianto, consentendo di raggiungere, con un corretto dimensionamento, un contenuto finale di sostanza secca del 40% (Nielsen,2003).

### Quantità di fango immessa

La quantità di fango, da introdurre nelle vasche giunte a regime, è un valore empirico dettato dall'esperienza. In letteratura è possibile trovare i valori consigliati da differenti autori, in base alla natura del fango (*Tabella 7*).

Si vuole far presente che, oltre ai dati sopra riportati, è possibile, per il dimensionamento, riferirci anche ad un'equazione sperimentale, utile per determinare il *carico di fango affluente* proposta da Lienard (1995):

---

\* Nota: <cal indica che la quantità misurata è minore dell'intervallo di calibrazione

$$S = \left\{ (T * Q) - \left[ \left( R + \frac{\Delta sludge}{10} \right) * A \right] \right\} * C$$

Dove:

- **S**: quantità del carico di fango affluente (in kg).
- **T**: tempo tra due carichi successivi (in secondi).
- **Q**: portata della pompa idraulica (in litri /secondi).
- **R**: altezza di pioggia tra due carichi consecutivi (in millimetri).
- **$\Delta sludge$** : differenza tra i livelli di fango ispessito calcolato tra le due misurazioni conteggiato sia in positivo che in negativo.
- **A**: area della superficie delle vasche (metri quadrati).
- **C**: il valore medio della concentrazione di MLSS nella vasca di ossidazione (in grammi/litro).

In questa formula non compare il contributo legato all'evapotraspirazione, per cui il carico che ricaviamo è da considerarsi quello minimo, come se il dimensionamento avvenisse durante la stagione invernale, quando l'effetto dovuto a questo fenomeno può ritenersi trascurabile.

La quantità di fango prodotta consente di stabilire il numero e la superficie delle vasche (*Tabella 7*), in modo da garantire un corretto funzionamento dell'impianto ed evitare fenomeni di sovraccarico, che porterebbero ad un rapido deterioramento della vegetazione e al formarsi di un ambiente anossico con produzione di metano. A questo riguardo, Nielsen (2003) propone 8-10 letti per quantità di liquame dell'ordine di 500-1000 ton secco/anno e 12-14 vasche per produzioni di fango superiore alle 1000 ton secco/anno.

Il numero così elevato è messo in relazione al funzionamento stesso dell'impianto che, come già menzionato, prevedendo l'alternanza tra periodi di carico e riposo, necessita di superfici tali da assicurare lo smaltimento di tutto il fango, quando una o più vasche sono in arresto.

È, quindi, buona norma sovradimensionare il sistema, sia per anticipare l'incremento di fango futuro, sia per garantire il corretto processo durante la fase di svuotamento dei letti: quando si sospende l'alimentazione di una vasca le rimanenti devono essere in grado di gestire l'intero carico.



### Qualità del fango

Altro parametro è la qualità del fango (viscosità, contenuto di solidi totali, ecc...) che può avere una profonda influenza sulla sua trattabilità da parte delle piante.

Si è osservato che, ad esempio (De Maseseneer 1997), un alto contenuto di sodio genera un fango talmente fluido da creare ad uno strato superficiale spesso e duro, che impedisce sia il passaggio d'ossigeno all'interno del fango, sia la fuoriuscita di gas da esso con effetti disastrosi sulla vegetazione.

Questo mette in risalto l'importanza legata all'aerazione e alla necessità di avere un fango ben ossigenato che può ottenersi attraverso il corretto dimensionamento della struttura drenante, la quale ha il doppio compito di raccogliere e allontanare il percolato e di trasferire ossigeno al sistema.

La natura del carico influenza anche la scelta del sistema di distribuzione. Questo deve garantire una ripartizione uniforme del fango, che disponendosi in strati simili assicura un'omogenea fitomineralizzazione ed impedisce il formarsi di zone di accumulo, dove il generarsi di un ambiente anaerobico porta ad un ingiallimento e conseguente scomparsa delle essenze.

Ancora in maniera del tutto empirica si consiglia di adottare una bocca di distribuzione ogni 25m<sup>2</sup> massimo di superficie del letto (Nielsen, 2003).

## **2.5 Cicli di carico/ riposo**

La scelta del ciclo di carico e riposo d'adottare è uno degli aspetti più delicati nel dimensionamento e nella gestione di questi impianti.

A questa alternanza è direttamente collegato il buono stato delle piante e la capacità disidratativa del fango, da cui dipende lo spessore di secco accumulato all'interno dei letti e quindi la vita utile del sistema.

I cicli utilizzati in letteratura sono ancora lasciati a scelte soggettive, ad esempio 1 giorno di carico e successivi 7 giorni di riposo, o 2 giorni di carico consecutivi 14 giorni di riposo (Nielsen, 1994), per le altre proposte si rimanda alla *Tabella 7*.

Tutti gli autore sono però concordi nel ritenere nocivo il caricamento quotidiano dei letti così come poco proficuo un periodo troppo breve di riposo, infatti:

- Si ha un'insufficienza di drenaggio che impedisce al fango di disidratarsi bene raggiungendo un contenuto di secco molto inferiore a quello possibile circa il 40%.(Nielsen, 2005).
- Lo stato di saturazione da vita a condizioni ambientali insostenibile dalle piante, inibendone la crescita e la copertura vegetale.(Nielsen, 2005).
- L'insufficiente drenaggio, unito al fango residuo, creano uno strato superficiale spesso e duro all'interno del quale non si ha la formazione di crepe.

Le crepe hanno un enorme valore nel processo di fitomineralizzazione, poiché contribuiscono a rendere il terreno poroso aiutando l'aerazione e la percolazione (Nielsen, 2005) e al contempo, rendono la superficie del fango irregolare e scabra, aumentando l'area evapotraspirante (Nassar, 2006).

## **2.6 Analisi dell'evapotraspirazione**

Al fine di stabilire il ruolo svolto dalla vegetazione è possibile utilizzare un semplice bilancio idrico con un'equazione del tipo:

$$Q + P_i + A_i = P_e + E + A_u + ET$$

- ***Q***: portata d'acqua presente nel fango in ingresso alla vasca.
- ***P<sub>i</sub>***: contributo d'acqua dovuto alle precipitazioni atmosferiche.
- ***A<sub>i</sub>***: quantitativo d'acqua presente nel letto all'inizio della misurazione.
- ***P<sub>e</sub>***: acqua persa attraverso lo strato filtrante per mezzo della percolazione.
- ***E***: liquido evaporato
- ***A<sub>u</sub>***: acqua presente nella vasca alla fine della misurazione.
- ***ET***: acqua persa per evapotraspirazione grazie alla presenza delle piante.

Tale formula è piuttosto semplice ed intuitiva, in realtà, si fa notare, come la raccolta dei dati e la presenza di diverse variabili che non sono menzionate (contributo della temperatura, l'umidità dell'aria, l'irraggiamento solare...) spesso conducano a risultati qualitativi piuttosto che quantitativi.

Partendo sempre dalla formula di bilancio, Nassar (2005) utilizzò per una stima dell'evaporazione/evapotraspirazione l'equazione:

$$E = \frac{(Q_m - Q_d) * 1000}{A_s} + P$$

- **E**: Evaporazione o evapotraspirazione (mm/mese).
- **Q<sub>m</sub>**: carico idraulico (m<sup>3</sup>/mesi).
- **Q<sub>d</sub>**: portata drenata (m<sup>3</sup>/mesi).
- **A<sub>s</sub>**: Area di accumulo (m<sup>2</sup>).
- **P**: precipitazioni (mm/mese).

L'autore non prende in considerazione nella formula l'acqua accumulata nei letti tra due carichi successivi ipotizzando tale valore costante. Questa ipotesi può risultare azzardata se si considera che il contenuto di umidità nel terreno non dipende esclusivamente dal caricamento e dalla scelta del ciclo carico/riposò ma anche ,in maniera rilevante, dalle condizioni meteo-atmosferiche che possono modificarsi sensibilmente.

Nassar (2006) fa infine osservare come il valore dell'evapotraspirazione che si ottiene sia quello attuale e non potenziale; soprattutto in estate i letti rimangono saturi solo per i primi 4-5 giorni mentre il calcolo dell'evaporazione è esteso all'intero periodo del ciclo.

## **2.7 Percentuale di secco**

In riguardo al processo di disidratazione si ipotizza che il fango possa essere disidratato fino ad un massimo di contenuto di secco pari al 40%, ciò significa che la sola acqua rimasta è quell'adsorbita e strutturale (Nielsen,2003).

La correlazione tra il contenuto di secco all'inizio e alla fine del periodo di riposo può ottenersi mediante la seguente formula (Nielsen,1993):

$$TS(t) = TS(t_{\infty}) + \left( \frac{TS(t_i)}{TS(t_{\infty})} \right) * \exp \left[ - \left( 100 * \frac{Ep}{V_{tot} * TS(t_{\infty})} \right) * t \right]$$

Con:

- **$TS(t_{\infty})$** : percentuale di secco massima ottenibile.
- **$TS(t_i)$** : percentuale di secco iniziale.
- **$Ep$** : evapotraspirazione potenziale (m<sup>3</sup>/giorno).
- **$V_{tot}$** : volume totale (acqua+fango) iniziale del secco (m<sup>3</sup>).
- **$t$** : tempo (giorni).

Nella formula non compare il contributo della pioggia per cui il valore finale è sovrastimato.

La maggioranza degli autori calcola il rendimento del sistema e quindi la percentuale di secco che si viene ad accumulare attraverso la misura dell'altezza di fango nella vasca (*Tabella 7*)

Altri invece pesano direttamente il fango una volta che il sistema viene dismesso.

La percentuale di secco e quindi l'efficienza della disidratazione incide sulla vita utile dell'impianto, minore è la quantità di residuo accumulata nei letti maggiori sono gli anni d'utilizzo.

## **2.8 Influenza diretta del clima**

Abbiamo già avuto modo di osservare come il clima incida su questo tipo di sistema.

Dalle analisi condotte si è rivelato che il processo di fitomineralizzazione da risultati migliori quando il sistema è localizzato in aree dove in inverno la temperatura può scendere anche al di sotto dello zero.

Il gelo e il successivo disgelo possono convertire un fango fluido in un materiale granulare che drena immediatamente dopo il disgelo. Questo fenomeno ha lo stesso

effetto su molti tipi di fango, ma è particolarmente efficace su quelli chimici e biochimici contenenti allume, che sono estremamente lenti da drenare naturalmente (Reed, 1995).

Esperienze condotte da Burgoon (1997), in zone aride, hanno evidenziato come questi sistemi diano comunque ottimi risultati se si riescono a mantenere buone condizioni di umidità nei letti soprattutto nelle calde giornate ventose, che più di ogni altra cosa sembrano incidere sulla buona salute dell'impianto. Per evitare condizioni di stress nella vegetazione l'autore consiglia di tenere il livello dell'acqua tra gli 8-15 cm al di sotto della superficie della sabbia lasciando così le radici sempre in condizioni sature; il tutto può ottenersi semplicemente ravvicinando i tempi di carico.

Dalla stessa indagine sperimentale Burgoon(1997) notò che non esiste correlazione tra carico e filtrato, mentre sarebbe plausibile aspettarsi che ad un carico minore corrisponda una qualità migliore del filtrato;una possibile spiegazione può essere data dalla necessità di lasciare sempre, per questi sistemi, una certa quantità di acqua nel terreno.

Di diverso avviso Nassar (2006) che asserisce come il clima più caldo possa favorire tutti i processi legati alla fitomineralizzazione.

## **2.8.Vantaggi e svantaggi degli impianti**

La curiosità verso questi tipi di impianti si sta facendo crescente grazie al loro basso costo, al facilità di manutenzione e alla qualità del fango che alla fine se ne estrae.

Queste peculiarità unite alle esigenze che stanno emergendo anche per l'introduzione delle Direttive Europee e delle nostre normative rendono il sistema di fitomineralizzazione un'alternativa convincente nello scenario del trattamento dei fanghi.

Inoltre i letti di fitodisidratazione ben s'inseriscono nell'ambiente circostante creando dei veri e propri piccoli ecosistemi con la presenza oltre che delle piante anche d'insetti, piccoli animaletti e volatili.

Tra gli effetti benefici non è da sottovalutare una riduzione consistente delle maleodoranze legate ai fanghi, soprattutto per gli impianti che si trovano inseriti in un contesto urbano o suburbano.

Come abbiamo avuto modo di dire le piante hanno anche la capacità di estrarre e concentrare nella loro parte fogliaria una buona parte dei metalli pesanti che si possono trovare disciolti nel fango, questo consente, una volta tagliate le essenze, di avere un fango con caratteristiche chimiche migliori e dei vegetali altamente inquinanti ma che possono essere direttamente trattati in discarica.

Tra le note negative sicuramente la necessità di ampi spazi per poter costruire un numero adeguato di vasche, aspetto spesso limitante soprattutto in un territorio come l'Italia che per l'orografia non è in grado di offrire superfici sufficienti.

Altro contro è la forte dipendenza del processo di disidratazione con le condizioni meteo-climatiche che rendono le zone piovose poco indicate a questo tipo di trattamento.

## **2.9 Considerazioni riepilogative**

La *Tabella 7* riporta i raffronti tra tutti gli autori ritrovati in letteratura.

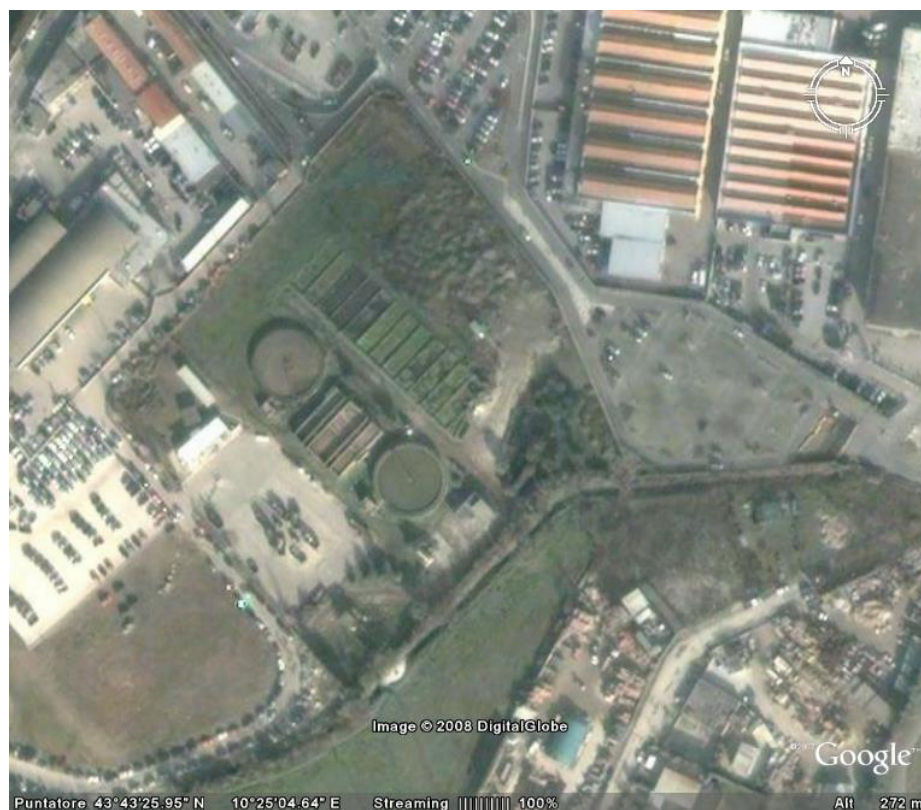
Riferimento bibliografico	località	AE	Medium	N° letti	Area letti	Caratteristiche dei fanghi			Carichi applicati			Cicli di carico	Bordo libero	Vita Utile	H Fango accumulato	Velocità filtrazione	Tempi di Riposo svuotamento	Qualità acqua da trattare	Superfici richieste
						Tipo	Conc. Applicate %SS	Conc. finali	KgSS/m² giorno	m³/anno	H metri/anno	Giorno/giorno	metri	anni	metri	l/m² min	mesi	Se deve essere ritrattata	m² per p.e
Begg <i>et al.</i> (2001)	Buckland MA		Pietrisco Sabbia grossa		495	Fanghi attivi				668			1,8	8	1,2		12-24		
Burgoon <i>et al.</i> (1997)	Washington USA		Pietra drenante Sabbia grossa	25	1000	Fanghi agricoli	0,7		40			1/7		7-10	1,5-2				
Chiapella <i>et al.</i> (2003)	Cuneo IT		Ghiaia Ghiaietto Sabbia	2	400	Fanghi azieda vinicola			62,5	530			1,1	7					
De Maeseneer (1997)			Strato isolante			Fanghi di dragaggio								6-10					0,25-1
Edwards <i>et al.</i> (2001)	Rugely UK		Pietra Ghiaia Ghiaietto Sabbia	2	7	Fanghi agricoli							0,5						
Garuti (2003)			Ghiaia Ghiaietto Sabbia			Fanghi attivi	2		30-60			1/10 1/20		10	1	0,01	6		4-6
Huertas (2001)	Barcelonna Sp	1300	Ghiaia Sabbia	8	225,6				20-25	4-5gior		5/7	0,3-0,5						
Lienard (1990)	Bourg-Argental F		Sabbia Ghiaia		60	Fanghi attivi	1,1-5	11	55										4
	Karlsruhe D					Fanghi chimici	5-12		92										
	Usterbach D					Fanghi attivi	0,9		30-40										
	Gemmingen D					Fanghi attivi	7,3		147										
	Dornstadt D					Fanghi attivi	0,4		23										
	Witzenhausen D					Fanghi anaerobici	3,5		46										
Lienard (1995)			Mattoni forati Ghiaia Sabbia	2	40	Fanghi attivi		11	120-160			1/1 1-2/14 3-7/28		2-3			70		
Kim (1994)	Fort Campbell USA			4	1860	Fanghi anaerobici	3	15-47											
Kim (1997)						Fanghi anaerobici		5-10		53			1-1,5	10	0,71				
Masciandaro <i>Et al.</i> ( 2006)	Pontedera Pisa IT	2500	Ghiaia Ghiaietto	4	100	Fanghi attivi	2			480		1/15			0,2				
Nassar <i>Et al.</i> (2006)	Palesina		Ghiaia Ghiaietto Sabbia	1	200	Fanghi attivi	1-2			2160		1/15							
Nielsen (1990)	Restrup DK	2000	Sassi Ghiaia	4		Fanghi attivi	0,4		46,7		10								
	Allerslev DK		Sassi Ghiaia	2	215	Fanghi anaerobici	4		71,6		1,7								
Nielsen (1993)	Allerslev DK	1000	Sassi Ghiaia	2	215	Fanghi anaerobici	4	15-25	57										
	Naskov DK	30000	Sassi Ghiaia	10	11600	Primario	1-2		75										
	Galten DK	10000	Sassi Ghiaia	6	2377	Fanghi attivi chimici	1		64										
	Gislenge DK	3520	Sassi Ghiaia	3	700	Fanghi attivi	1		60										
	Regstrup DK	2000	Sassi Ghiaia	4	415	Fanghi attivi chimici	0,4	22-30	60	825									
Nielsen (1994)	Rudkobing DK	15000	Terra	8	4000	Fanghi attivi chimici	0,5-1,0		60			7/49 21/105		8-10	0,97		6-12		
	Rudkobing DK	15000	Terra	8	3900	Fanghi attivi chimici	0,5-1,0		60	21000									
Nielsen (2003)	Helsing DK			10	10500	Fanghi attivi	0,5-0,7		60	630		1-4/10-20 4-5/30-40 5-7/55.65		8-10	0,79		6-12		
Sassaman (1992)	Myerstown		Sabbia	6	2787	Fanghi attivi	3,5	40-50			1,63-2,44								

Tabella 7-Comparazione di impianti di fitodisidratazione (Lienard,1990,in Garuti,2002 adattato ed integrato)

## ***Capitolo 3-Descrizione impianto sperimentale***

### **3.1 Descrizione dell'impianto analizzato**

Per la fase sperimentale del presente lavoro, è stato analizzato l'impianto di fitodisidratazione dei fanghi attivato nell'anno 2005 presso il complesso di depurazione "La Fontina" (Pisa, centro Italia 43°43'N, 10°, 25'E).



**Figura 6-Vista del depuratore La Fontina.**

Il depuratore tratta le acque residue provenienti dalla rete fognaria di Pisa.



I dati di progetto sono:

- Popolazione asservita totale 30.000 ab.
- Dotazione idrica pro capite centro abitato 400 l/ab.
- Portata media di tempo secco totale 500 m<sup>3</sup>/h
- BOD<sub>5</sub> 233 mg/l
- Solidi sospesi 266 mg/l

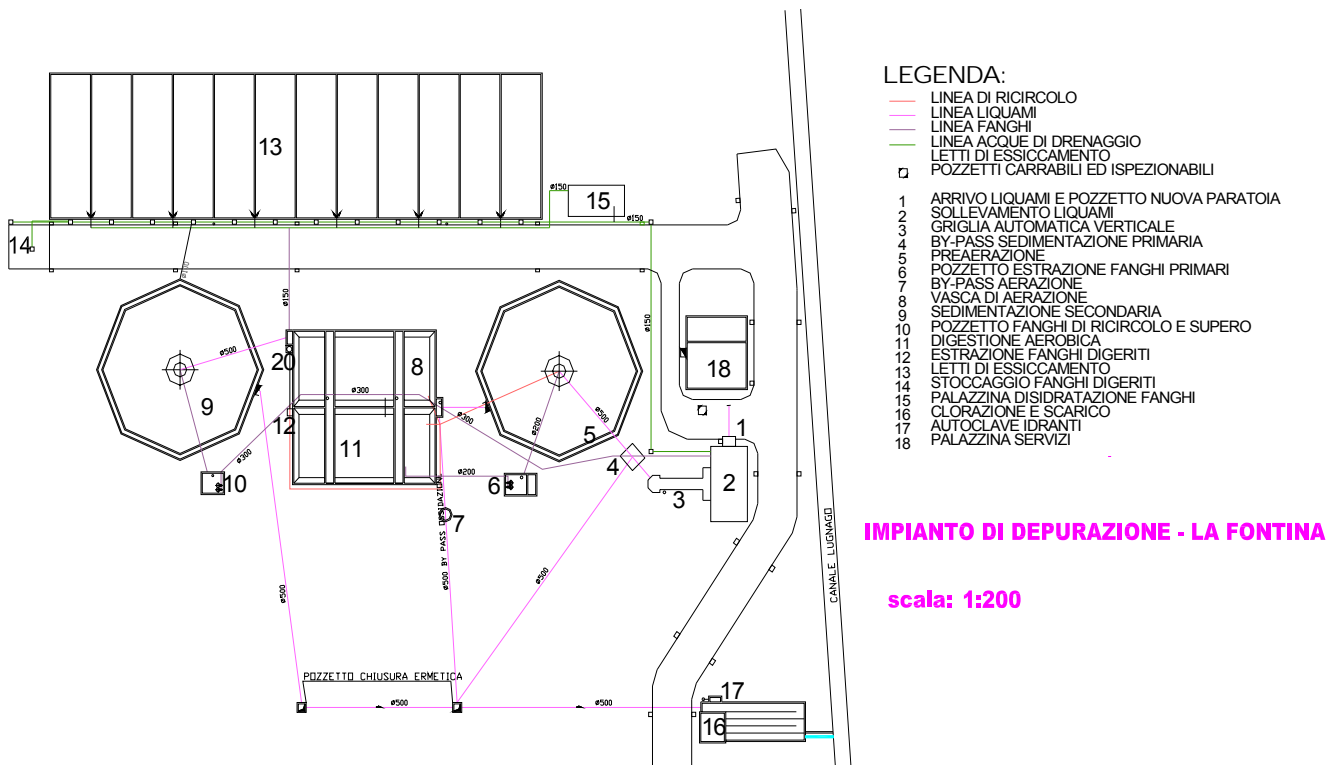


Figura 7-Planimetria depuratore La Fontina.

L'impianto è costituito dalle seguenti opere:

**1. Trattamenti Preliminari**

- Pozzetto di sollevamento iniziale (volume utile  $50 \text{ m}^3$ ) è dotato di n°2 pompe (Flygt da  $320 \text{ m}^3/\text{h}$ ) a servizio del depuratore La Fontina e di una pompa (Flygt da  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ ) che invia i liquami eccedenti al depuratore San Iacopo.
- Griglia curva a pulizia automatica per sgrossatura pulizia liquami.

**2. Processo Biologico**

- Vasca di ossidazione circolare (diametro 23 m-altezza media d'invaso 2,40m-superficie utile  $416 \text{ m}^2$ -volume utile  $1073 \text{ m}^3$ ) munita di n°3 Flojet Flygt da 22 Kw.
- Vasca di aerazione liquami rettangolare ( $21,00 \times 10,50 \text{ m}$ -altezza d'invaso 3,70m-volume utile  $815 \text{ m}^3$ ) munita di n°3 Flojet Flygt da 22 Kw.
- Sedimentatore fanghi circolare (diametro 23m-altezza media invaso 2,45m-superficie utile  $416 \text{ m}^2$ -volume utile  $1073 \text{ m}^3$ ).
- Digestore aerobico a sezione rettangolare ( $21,00 \times 10,50 \text{ m}$ -altezza d'invaso 3,70m-volume utile  $815 \text{ m}^3$ ) dotate da n°2 Flojet Flygt da 22Kw.

**3. Disinfezione**

- Bacino di clorazione a sezione rettangolare ( $5 \times 16 \text{ m}$ -altezza d'invaso 1,90m-volume utile  $150 \text{ m}^3$ ).

**4. Trattamento Fanghi**

- n°12 letti di essiccamento per il trattamento naturale dei fanghi di forma rettangolare ( $5,5 \times 20,0 \text{ m}$ )

In origine, i fanghi erano trattati nei letti d'essiccamento, con il tempo, però tale complesso è risultato insufficiente a sopperire alle necessità dell'impianto perciò tali strutture sono state dismesse.

In mancanza di un idoneo sistema di trattamento dei fanghi questi vengono prelevati mediante camion botti e trattati presso il depuratore di San Iacopo, con tutti i disagi che ne deriva tra cui il rischio ambientale, non trascurabile, di immettere materiale altamente inquinante per strade urbane e a costi elevati di smaltimento.

È anche sulla base di tali considerazioni che la società ACQUE SPA ha deciso, in via sperimentale, in collaborazione sia con il C.N.R. che con la Facoltà di Ingegneria di Pisa, di trasformare i vecchi letti ormai in disuso in letti di fitomineralizzazione.

### **3.2. Trasformazione letti di essiccamento in fitodisidratazione**

I letti sono stati ripuliti da anni di inoperosità e si è provveduto a risanare, là dove necessario, sia le murature che il sistema di drenaggio.

A questo proposito si è scelto di adottare due strati di ghiaia:

- quello più profondo costituito da ghiaia da 4-7mm
- quello superficiale di granulometria da 1mm.

A completare il sistema si è infine provveduto ad piantati i rizomi delle macrofite radicate emergenti (*Phragmite* o cannuccia d'acqua).

I fanghi, provenienti direttamente della vasca biologica e quindi ancora molto liquidi (normalmente al 98% di acqua), sono distribuiti a strati, nella maniera più uniforme possibile, sulla superficie dei letti in modo da permettere la percolazione delle acque e l'ispessimento dei fanghi. Le acque di percolazione sono naturalmente riciclate all'interno dell'impianto di depurazione.

Come già riportato il depuratore è costituito da dodici letti, ciascuno di forma rettangolare ed area pari a  $110 \text{ m}^2$  (5.5 m x 20.0 m). Il carico idraulico di riferimento si attesta tra 0.10 m e 0.12 m ogni due settimane, corrispondente ad un volume alimentato di  $11 - 13 \text{ m}^3$ .

Durante lo studio, limitatamente ai letti monitorati, il carico idraulico è stato modificato in accordo con le esigenze sperimentali.

L'applicazione dei liquami avviene a gravità per mezzo di un bocchettone che preleva i fanghi direttamente dalla vasca biologica.

Il carico si realizza per strati non troppo spessi al fine di non creare accumulo eccessivo di liquido sul fondo drenante, e quindi condizioni di anaerobiosi spinta.



**Figura 8-Letti di essiccamento: vista d'insieme**

Il battente che si ottiene, a riempimento ultimato, è di 10-12 cm questo fa sì che alla fine dello sversamento il volume di liquame ammonti a 11,37-13,65 m<sup>3</sup>.



**Figura 9-Sistema di alimentazione.**

Delle dodici vasche, a disposizione dell'impianto:

- undici sono state piantumate con *Phragmites australis*; la scelta dell'essenza vegetale è stata dettata dalle qualità della PA: ottima capacità di adattarsi alle repentine variazioni di carico, rapido sviluppo vegetativo grazie alla sua natura rizomatica, ridotto costo e facilità di approvvigionamento.
- Una vasca non è stata piantumata, questo per consentire delle comparazioni tra i differenti sistemi.

Il medium di riempimento utilizzato per le vasche piantumate è ghiaia (4cm – 7cm) avente permeabilità (k) elevata, mentre per quella non piantumata è stata utilizzata della sabbia mista a ghiaia con permeabilità  $k = 0.17 \text{ cm/sec}$ ; la differenza ha consentito di osservare ed analizzare non solo, la diversità di comportamento tra un letto dotato di vegetazione ed uno privo ma, anche di mettere a confronto sistemi con substrati differenti, evidenziando l'importanza del ruolo ricoperto dalla scelta di questo dato progettuale.



Figura 10-Medium vasca piantumata.



Figura 11-Medium vasca non piantumata

### 3.3 Descrizione della sperimentazione

Lo studio, come già ribadito, mira ad analizzare le dinamiche del processo disidratativo avendo tra gli obiettivi anche quello di determinare e calibrare una relazione tra contenuto d'acqua e tempo ( $WC;t$ ) che, possa costituire uno strumento utile all'ottimizzazione e realizzazione di un impianto di fitodisidratazione.

La determinazione di tale curva ha lo scopo di fornire un supporto analitico in grado di fissare la durata tra un ciclo di carico e l'altro in maniera tale ottenere un buon grado di

disidratazione e al contempo monitorare i parametri geometrici per realizzare una buona progettazione e contenere i costi.

La scelta di fare campionamenti in due differenti periodi stagionali ci ha consentito di esaminare il ruolo svolto dalla vegetazione e dalle condizioni climatiche sul grado di stabilizzazione dei fanghi.

Infine aver monitorato contemporaneamente un letto con *Phragmites* ed uno classico di essiccamento, vicini spazialmente e quindi soggetti a stesse condizioni climatiche-ambientali, ma con differente granulometria ha messo in risalto il ruolo non marginale della scelta del medium di riempimento.

Per determinare il contenuto di acqua si è scelto di adoperare il metodo gravimetrico (descritto in dettaglio in 3.4 ), tale scelta è stata dettata sia dalla semplicità applicativa del metodo che dalla sua affidabilità, accanto però è necessario ricordare che tale metodo si è sempre applicato a terreni vegetali e non a sostanze molto organica come risultano i fanghi di depurazione.

La nostra sperimentazione, come già introdotto, ha previsto diverse campagne di raccolta dati suddivise in due periodi uno estivo ed uno invernale. *Tabella 8.*

<b>PERIODO ESTIVO</b>	<b>GIORNI</b>	<b>PERIODO INVERNALE</b>	<b>GIORNI</b>
8 Giugno-27 Giugno	20	28 Novembre-14 Dicembre	17
27 Giugno-17 Luglio	21	10 Gennaio-30 Gennaio	21
21 Luglio-10 Agosto	21	5 Febbraio-26 Febbraio	22

**Tabella 8-Cicli di campionamento.**

La scelta di monitorare la variazione di umidità sia in piena estate a vegetazione fiorente che in pieno inverno quando la vegetazione è in fase di riposo ha come scopo quello di stabilire l'influenza dell'essenza vegetativa, della granulometria e del clima sul grado di disidratazione dei fanghi ma anche, quello di generare una equazione tra W.C. e  $t$  che fornisca elementi utili per la progettazione e l'analisi di un impianto disidratativi.





**Figura 12-Situazione vegetativa periodo estivo**



**Figura 13-Situazione vegetativa periodo invernale.**

#### Problematiche riscontrate.

Durante la fase di campionamento le problematiche che si sono presentate dovuto sono state la necessità di adottare una metodologia che assicurasse di prelevare dei provini quanto più indisturbati possibili in modo da non alterare il contenuto d'acqua e quindi la bontà delle misurazioni

Altra nota era quello di stabilire con che grado di errore si potessero considerare corrette le nostre misurazioni.

Una volta terminata la raccolta dati, depurati quelli ritenuti errori di misura si è mossi a determinata, mediante interpolazione dei dati, una curva che descrivesse al meglio i valori ottenuti.

Nella stesura della relazione è emerso, dati alla mano, che non era possibile operare in maniera lineare pensando di poter sovrapporre i vari effetti tra loro quali evapotraspirazione, pioggia...essendo i fenomeni fortemente interconnessi e difficilmente separabili.

L'unica semplificazione adottata è stata la suddivisione di due fenomenologie:

1. la percolazione prevalente nella prima fase
2. l'evapotraspirazione dominante nella fase successiva.

Accanto a tale semplificazione, si sono descritte due differenti curve di WC relative ai due periodi stagionali, questo per la forte differenziazione del comportamento dell'impianto nei due intervalli.

### **3.4 Materiali utilizzati**

Per la determinazione del contenuto d'acqua è stato utilizzato, come detto, il metodo gravimetrico.

Nella sperimentazioni si sono adoperati i seguenti materiali:

- Fustelle (Eijkelpkamp, The Netherlands) con le seguenti caratteristiche geometriche:
  - diametro  $\Phi=5\text{cm}$
  - altezza  $h=5,1\text{cm}$

come mostrato in *Figura 14*.



**Figura 14-Fustella per campionamento (Eijkamp-The Netherlands)**

Tale strumento è dotato d'appositi tappi che consentono una chiusura ermetica del prelievo effettuato.



- Contenitori d'alluminio di dimensioni sufficienti a contenere il campione estratto ed in grado anche di resistere a temperature comprese tra i 100-110°. *Figura 15.*
- Sacchetti di plastica dotati di chiusura ermetica.
- Bilancia digitale di precisione del centigrammo 0.01 (Europe 1000-Gibertini, Italia). *Figura 16.*



**Figura 15-Contenitore resistente a temperature di 105°**



**Figura 16-Bilancia di precisione.**

- Forno elettrico in grado di mantenere la temperatura costante di 105 °C.
- Essiccatore. *Figura 17.*



**Figura 17-Essiccatore.**

- Pluviometro *Figura 18*.

Quest'ultimo strumento è stato realizzato artigianalmente a tale scopo si è fatto uso di:

- a) Un imbuto con di diametro  $\Phi=26$  cm.
- b) Un secchio di diametro  $\Phi=26$  cm.

Il pluviometro è stato sistemato nelle vicinanze delle vasche da monitorare per consentirci di misurare i millimetri di pioggia caduti durante la sperimentazione . *Figura 18*.



**Figura 18-Pluviometro.**

### 3.5 Procedura e metodo impiegati

La procedura messa a punto ha tenuto conto della norma UNI EN 1097-5:2000\*.

I campioni sono stati prelevati in campagne successive (*Tabella 8*), si è convenuto di adottare cicli di carico di durata pari a 20-21 giorni e di sversare in vasca uno spessore di fanghi pari a 10-12 cm in modo che le condizioni iniziali di osservazione fossero tra loro paragonabili.

Il campionamento è stato eseguito ogni mattina tra le 8:00-8:30, questo dal lunedì al venerdì, mentre non è stato possibile prelevare i campioni nel week-end.

---

\* “Tests for mechanical and physical properties of aggregates-Determination of the water content by drying in ventilated oven”

Tale procedura è stata applicata sia per le stime estive che per quelle invernali.

I provini non sono stati prelevati nelle giornate piovose dove il calcolo dell'umidità era chiaramente sfalsata ma si è provveduto a recuperare, attraverso il pluviometro, i dati relativi alle precipitazioni.

Per confrontare i dati si è richiesto all'ARSIA le stime meteo, questa ci ha fornito i dati delle stazioni di Arena Metato (San Giuliano Terme, Pi) e di Pisa che, risultavano le più vicine al Depuratore La Fontina.

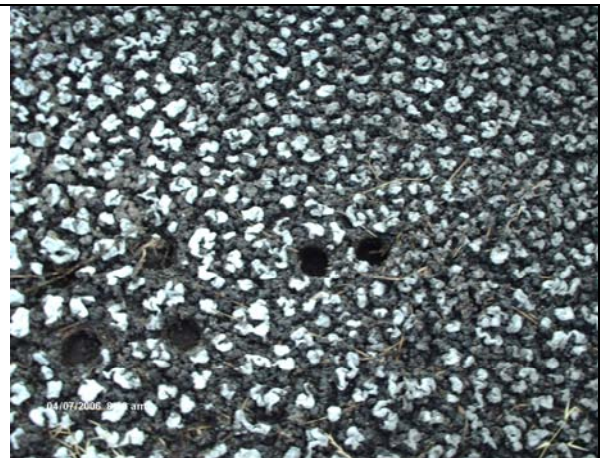
Il nostro studio prevedeva prelievi giornalieri di quattro provini dal letto piantumato e due da quello non piantumato.

I campioni estratti dalle vasche sono stati raccolti in maniera ravvicinata e nella stessa zona.

Tale scelta ha lo scopo di consentire un raffronto tra i dati estratti e quindi verificare la bontà delle misure eseguite. *Figura 19*



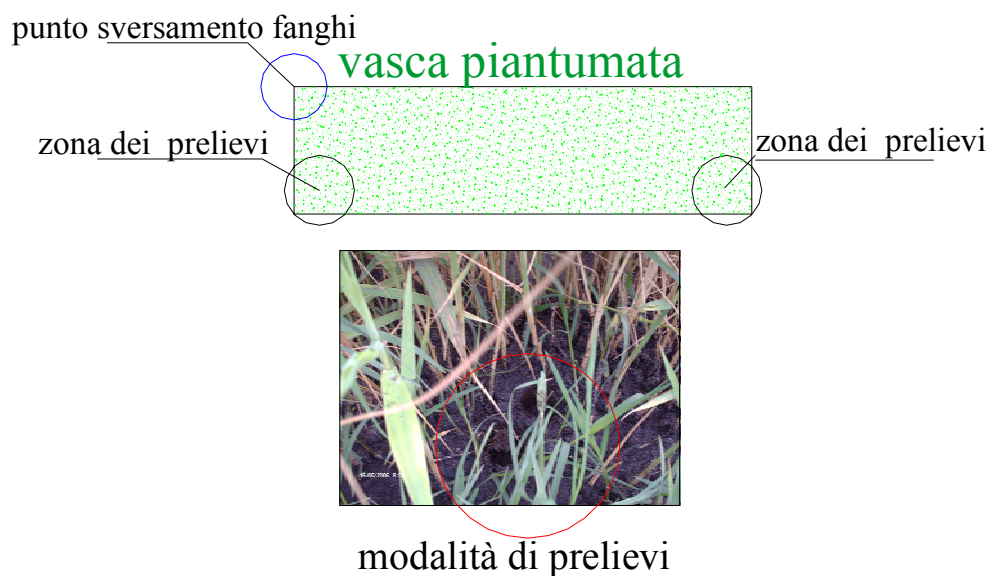
**Figura 19-Modalità di campionamento vasca piantumata.**



**Figura 20-Modalità di campionamento vasca non piantumata.**

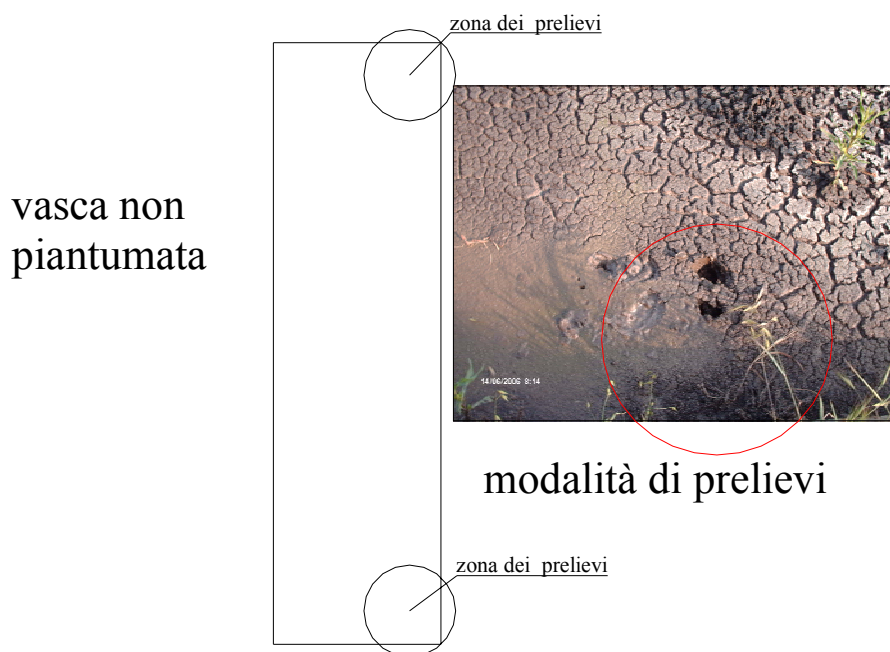
Il monitoraggio di zone opposte del letto a distanza non trascurabile tra loro (si ricorda che la lunghezza del letto è di 20 m) ha permesso di evidenziare il differente grado di umidità tra la zona prossima al bocchettone di alimentazione e quella più lontana.

I quattro campioni dalla vasca piantumata venivano estratti come mostrato nella *Figura 21*.



**Figura 21-Punti di prelievo e particolare di campionamento letto piantumato**

Nella vasca senza vegetazione si è invece preferito prelevare soltanto due campioni, anche qui ravvicinati, e nella stessa zona di quella con piantumate in modo da poter rendere i dati confrontabili. *Figura 22.*



**Figura 22-Punti di prelievo e particolare di campionamento letto non piantumato.**

Eseguito il prelievo, la fustella è immediatamente chiusa con gli appositi tappi e riposta all'interno di un sacchetto ermetico. Lo scopo del contenitore di plastica consente di limitare ulteriormente l'influenza dei fattori esterni sui provini estratti.

I provini vengono etichettati per consentirne la corretta identificazione.

Raccolti i campioni questi vengono portati in laboratorio dove si procede in maniera sistematica e secondo procedura a:

1. pesare il contenitore di alluminio vuoto per stabilire la tara. Sebbene i recipienti scelti siano sostanzialmente uguali, possono differire anche se poco tra di loro per cui non è possibile considerare una tara unica.
2. si estrae il campione dal sacchetto si aprono i tappi e si posiziona il contenuto nell'involucro da forno. I contenitori sono siglati in maniera identica al provino estratto in modo che non ci siano dubbi sulla natura della fustella esaminata.
3. si procede a pesare il sistema (campione + tara); questa misura rappresenta il dato in ingresso  $P_{in}$  (pesatura iniziale).
4. posizionati, pesati, suddivisi ed etichettati tutti i campioni prelevati nella giornata vengono infornati a 105°C per un periodo non inferiore alle 24 ore.
5. passate le 24 ore si tolgono i campioni dal forno, si inseriscono nell'essiccatore dove rimangono a raffreddare per almeno 30 minuti.
6. trascorso il tempo di raffreddamento si procede alla nuova pesatura dei campioni essiccati, il valore ottenuto viene denominato  $P_{fin}$  (peso finale o disidratato).

Note:

- La temperatura di 105°C, consente di ottenere la perdita della sola acqua libera e non di quella di legame.
- Il raffreddamento nell'essiccatore impedisce all'umidità dell'aria di legarsi nuovamente al campione disidratato alterando il valore di  $P_{fin}$ .

Compiute tutte queste operazioni i dati ottenuti vengono implementati nella seguente formula:

$$U = \frac{Pin - Pfin}{Pin - tara} * 100$$

- $U$ = contenuto di umidità %
- $Pin$ = pesatura iniziale (grammi).
- $Pfin$ = pesatura finale (grammi).
- $tara$ = pesatura contenitore alluminio (grammi).

I dati di umidità vengono, a questo punto, tabellati e registrati indicando giorno della misurazione, natura della vasca, zona di prelievo. (Tabella 9).

Ricordiamo che avendo fatto due prelievi ravvicinati alla fine il valore “buono” è quello ottenuto dalla media delle misurazioni.

Sempre per completezza di indagine si provvede, la dove se ne ritiene la necessità, di registrare delle note come millimetri di pioggia raccolti, eventuali anomalie nei prelievi e tutto ciò che si possa considerare inficiante e condizionante per la qualità e la bontà delle misure effettuate. Tabella 9 e 10.

Data prelievo gg/mese/anno				
letto piantumato				
campione 1-zona testa letto	$Pin=xy,xy$ $Pfin=xy,xy$	$U_1(\%)=$ campione1	$VALORE\ MEDIO$ $U_{medio}=(U_1+U_2)/2$	Osservazioni
campione 2-zona testa letto	$Pin=xy,xy$ $Pfin=xy,xy$	$U_2(\%)=$ campione2		
campione 3-zona fine letto	$Pin=xy,xy$ $Pfin=xy,xy$	$U_3(\%)=$ campione3	$VALORE\ MEDIO$ $U_{medio}=(U_3+U_4)/2$	
campione 4-zona fine letto	$Pin=xy,xy$ $Pfin=xy,xy$	$U_4(\%)=$ campione4		

Tabella 9-registrazione dati vasca piantumata.



Data prelievo gg/mese/anno				
letto bianco				
campione 1-zona testa letto	$P_{in} = xy, xy$ $P_{fin} = xy, xy$	$U_1 (\%) =$ campione1	<b>VALORE MEDIO</b> $U_{medio} = (U_1 + U_2)/2$	Osservazioni
campione 2-zona testa letto	$P_{in} = xy, xy$ $P_{fin} = xy, xy$	$U_2 (\%) =$ campione2		

**Tabella 10-Registrazione dati vasca non piantumata.**

### 3.6 Altri parametri monitorati

Per rendere ancora più esaustiva la nostra indagine si sono monitorare altri elementi tra cui:

1. L'indice di area fogliare L.A.I.
2. ET.evapotraspirazione

#### 3.6.1 Indice di area fogliare L.A.I.

L'indice di area fogliare (*Leaf Area index*) è un parametro utile per tenere sotto controllo lo sviluppo fogliare.

Questo è definito come area fogliare totale per unità di superficie la cui formula matematica è:

$$L.A.I. = \frac{n_{tot} * A_{media}}{S} \quad (r)$$

- $n_{tot}$ =numero totale di piante in una superficie di riferimento
- $S$ =area superficie di riferimento (metri quadrati).

- $A_{media}$  = area foglia di riferimento (metri quadrati ).

### 3.6.1.1. Metodo di misura adottato

La superficie di riferimento scelta è,  $S$  di 30\*30 cm all'interno della quale abbiamo conteggiato il numero  $n^\circ$  di piante presenti.

Successivamente abbiamo calcolato le foglie su ogni essenza ricavandone il valore medio.

Attraverso questi due valori si determina  $n_{tot}$  :

$$n_{tot} = n_{piante} * n_{foglie}$$

Per calcolare l'area fogliare si è adottata la seguente procedura:

1. prima di tutto, all'interno della superficie scelta, sono state identificate mediante del nastro telato rosso due piante siglate come essenza **A** e **B**. figura.23.



Figura 23-Piante di riferimento.



2. Su carta millimetrata si è riportato un quadretto di lato 1 cm\*1 cm. Dopo aver steso delicatamente la foglia di riferimento su questa pagina (*figura 24*), evitando per quanto possibile, di danneggiarla, si sono scattate alcune foto che centrassero contemporaneamente foglia e quadrettino di riferimento.



**Figura 24-Misurazione area fogliare**

3. il passo successivo è stato quello di importare su un foglio di lavoro di Autocad le foto e attraverso l'utilizzo di questo software, si sono tracciati i contorni sia della foglia, sia del quadratino di riferimento, e se n'è stimata l'area (*figura25*).

foglia di  
riferimento A



foglia di  
riferimento B



**Figura 25-Calcolo delle aree di riferimento per mezzo di un foglio Autocad.**

4. A questo punto, attraverso una semplice proporzione, siamo risaliti al valore dell'area  $A_{media}$  da inserire nella formula ( $\Upsilon$ ).

Il monitoraggio del parametro L.A.I. ha consentito non solo di tenere sotto controllo il regolare sviluppo delle piantine e la loro avvenuta ambientazione, ma anche di stabilire il valore massimo da poter adottare per i cicli di carico oltre il quale le foglie cominciavano a dare segni di sofferenza e stress.

A corollario delle osservazioni, si è misurata la parte di stelo compreso tra due internodi sempre come monitoraggio della crescita della piantina *figura 25*.



**Figura 26-Misurazione internodo**

### 3.6.2. Evapotraspirazione

Durante le misurazioni estive si è calcolato il tasso d'evapotraspirazione ( $ET_0$ ) utilizzando il modello proposto da *Priestley-Taylor (1972)*.

$$\lambda ET = \alpha \frac{\Delta^* A}{\Delta + \gamma}$$

- $\Delta$ =gradiente della pressione di vapore rispetto alla temperatura (kPa/K).
- $A$ = energia disponibile (W/m<sup>2</sup>).
- $\gamma$ = costante psicrometrica (kPa/K).
- $\alpha$ = parametro da calibrare.

La comodità del modello di Priestley-Taylor si deve oltre che alla sua semplicità, alla possibilità di poter passare dall'evapotraspirazione potenziale a quella reale parametrizzando direttamente il parametro  $\alpha$ .

Il valore di  $\alpha$  è stato ricavato interpolando i dati sperimentali estratti da un impianto pilota allestito all'interno della zona del CNR di Pisa (Iannelli e Giralì, 2007), in linea d'aria a breve distanza depuratore La Fontina. Le condizioni meteo-climatiche, temperatura, irraggiamento, umidità, pressione sono stati forniti dall'ARSIA.

Il valore calibrato del parametro  $\alpha$  è risultato pari a 2.21.

Durante il periodo invernale il calcolo dell' evapotraspirazione è stata sospesa ritenendo il suo contributo nullo ai fini della disidratazione dei fanghi.

Il valore delle precipitazioni invece è stato monitorato, come abbiamo già avuto modo di dire, in entrambi i periodi.

## Capitolo 4-Equazione WC/t

### 4.1 Modellazione

Compiute le misurazioni, l'obiettivo successivo è stato quello di interpretare i dati, per ricavare un'equazione tra contenuto d'umidità registrato giornalmente e intervallo di tempo tra due successivi carichi di fango.

L'equazione proposta è:

$$WC_1 = A * e^{-b*t} + C * e^{-d*t}$$

- WC<sub>1</sub>, contenuto d'acqua .
- A,b, parametri legati alla fase di drenaggio.
- C,d, parametri legati alla evapotraspirazione.
- t tempo.

L'utilizzo del doppio esponenziale si basa sull'ipotesi che il processo di disidratazione si possa suddividere in due fenomeni distinti:

1. una prima fase di drenaggio dovuto alla presenza del medium di riempimento.
2. una seconda fase legata all'evapotraspirazione e a tutti quei fenomeni connessi alla presenza di piante nei letti.

L'ipotesi di supporre la percolazione indipendente dall'evapotraspirazione può apparire forte, in realtà il processo di drenaggio è dominante nei primi 2 giorni dallo sversamento del fango(*figura27*), e perde di rilevanza nei giorni successivi dove subentrano gli effetti legati alle piante.



**Figura 27-Pozzetto di uscita letto di fitomineralizzazione nel giorno di caricamento dei fanghi.**

È stato impossibile utilizzare la stessa equazione sia nel periodo estivo sia in quello invernale, infatti, sebbene il primo esponente dell'equazione, legato alla percolazione rimanesse invariato (coefficienti  $A$  e  $b$ ), quello connesso all'evapotraspirazione (coefficienti  $C$  e  $d$ ) risentiva in maniera preponderante delle variazioni meteo-climatiche legate ai cambiamenti stagionali.

Per calibrare l'equazione si è utilizzato il metodo non lineare ai minimi quadrati (*Allegato A*).

Al tempo  $t=zero$  corrispondente al giorno di caricamento dei fanghi il valore di  $WC_0$  si attesta al 99-98% di umidità valore ricavato dalla natura dei fanghi in uscita dal sedimentatore con 1-2% di solidi .

$$WC_0 = A + C = 0.99$$

- $WC_0$ , contenuto d'acqua al tempo zero-
- $A, C$  parametri da calibrare.

## 4.2 Analisi dei risultati ottenuti

Per ogni campagna di misura abbiamo provveduto a riportare e confrontare per il letto piantumato e quello non piantumato il contenuto di umidità, il corrispondente contenuto di sostanza secca il grado di evapotraspirazione e gli eventuali mm di pioggia. (Tabella 11)

Intervallo di monitoraggio	Giorni di campagna dati	Umidità (%)		% Secco ottenuta		ET <sub>0</sub>	Pioggia
		L.P.	L.N.P.	L.P.	L.N.P.	(mm)	(mm)
8 Giugno-27 Giugno	20	60	57	40	43	134	0
27 Giugno-17 Luglio	21	56	51	44	49	254	17
21 Luglio-10 Agosto	21	71	51	29*	49	213	23
28 Novembre-14	17	91	**	9	//	#	21
10 Gennaio-30 Gennaio	21	91	**	9	//	#	6
5 Febbraio-26 Febbraio	22	92	**	8	//	#	11

**Tabella 11-Monitoraggio.**

Osservazioni:

- L.P.= letto piantumato.
- L.N.P.= letto non piantumato.
- La percentuale di secco riferita alla terza misurazione estiva 21/07-10/08 è inferiore alle precedenti perché il carico di fango distribuito sul letto, per motivi accidentali, è risultato pari a circa 17 m<sup>3</sup> e non ai soliti 13 m<sup>3</sup>.
- ET<sub>0</sub> non è stato valutato durante le misurazioni invernali.

Appare subito evidente confrontando i risultati ottenuti nel periodo invernale con quelli estivi il ruolo dell'evapotraspirazione sull'efficienza del processo disidratativi.

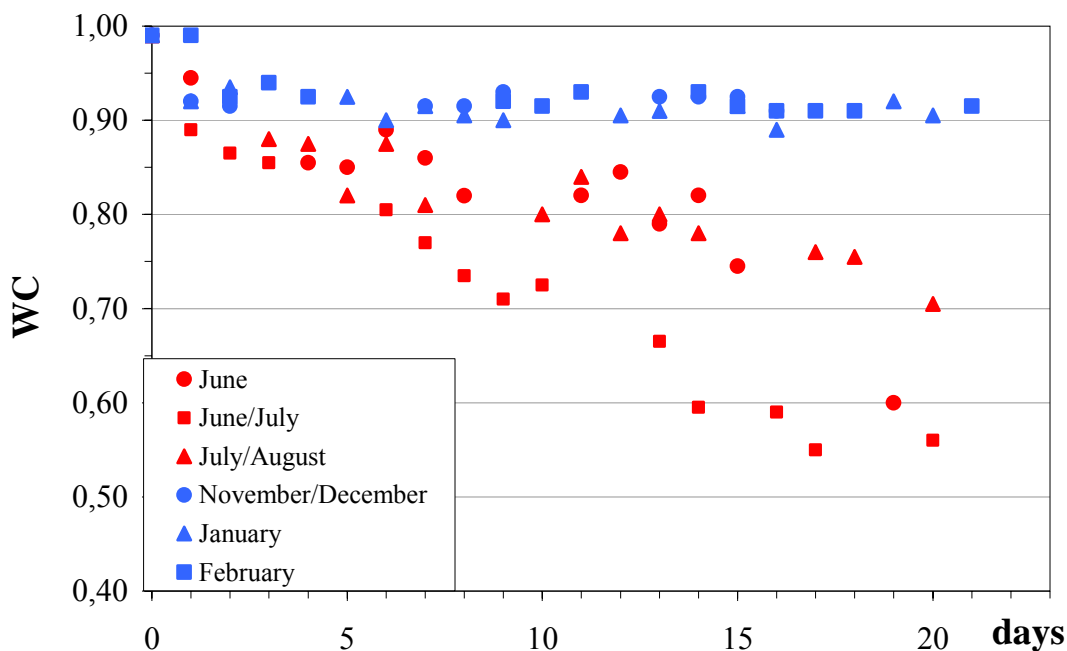


Figura 28 Diagramma con riportate le misure ricavate dalla campagna dati.

Dalla figura 28 si evidenzia come il valore di WC risulti, a parità di tempo, molto inferiore nelle misurazioni estive.

La distribuzione dei risultati è molto più omogenea nelle misurazioni invernali, ciò può essere giustificato dalla mancanza quasi totale dei benefici legati agli effetti meteorologici che influenzano, come già osservato, in maniera sostanziale i processi disidratativi.

Dalla tabella 11 si nota come durante il periodo invernale non sia stato possibile prelevare alcun campione dalla vasca non piantumata mentre, anche se con efficienza ridotta, i letti con *Phragmites* hanno sempre garantito almeno il drenaggio dei fanghi.

Tra i motivi che possono spiegare questo fenomeno se ne sottolineare due:

1. Le cannuce svolgono un effetto dinamico importante ai fini del drenaggio infatti, gli steli muovendosi per effetto del vento, permettono di mantenere areato lo strato di fango e creano dei cunicoli utili per far filtrare l'acqua di percolazione.
2. La scelta intenzionale di due medium differenti ha mostrato come l'utilizzo di uno strato iniziale di una ghiaia di dimensioni inferiori per i L.N.P. ha effetti positivi in estate dove, rallentando la percolazione aumenta l'effetto d'evaporazione, mentre risulta deleterio in inverno quando gli effetti benefici

dovuti al clima possono essere trascurati e la presenza di un dreno a granulometria sottile, impedisce il drenaggio creando condizioni anossiche deleterie (figura 29).



Figura 29-Condizione letto non piantumato periodo invernale

La figura 30 mette in evidenza gli effetti ottenuti a causa della differente scelta del filtro drenante.

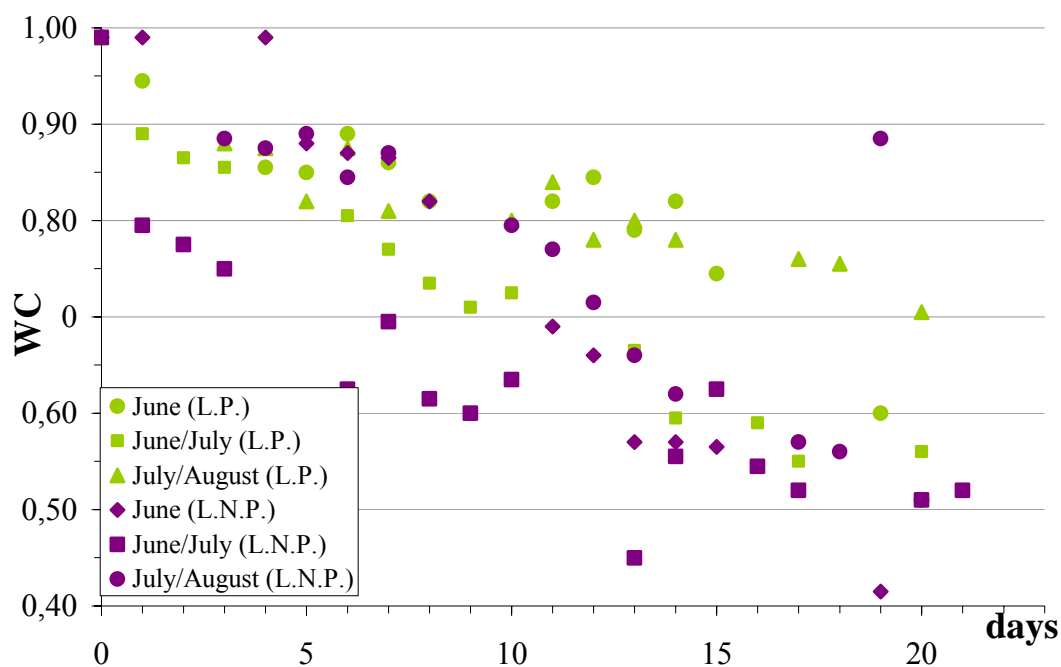


Figura 30-Confronto tra i dati misurati nel L.P. e nel L.N.P.



La scelta dei cicli di carico è stata testata intorno ai 20gg, ciò garantisce di ottenere un buon numero di misure e al contempo consente alle piante di non subire uno stress eccessivo dovuto alla mancanza d'alimentazioni.

### 4.3 Analisi dei dati raccolti

Partendo come detto dall'equazione doppio esponenziale riportata nel paragrafo precedente, si è proceduto a calibrare i dati raccolti suddividendoli tra il periodo invernale e quello estivo. (*Allegato A*)

#### 4.3.1 Equazione misurazione invernale

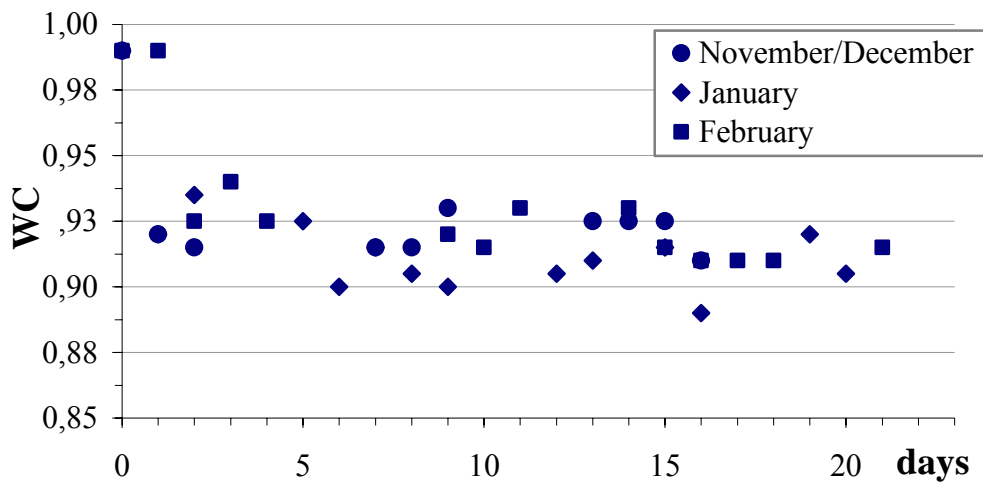


Figura 31-Dati campagna invernale.

l'equazione che ottenuta risulta:

$$WC_t = 0.07 * e^{-1.0772 \cdot t} + 0.92 * e^{-0.0005 \cdot t}$$

- $WC_t$ , contenuto d'acqua al variare del tempo.
- $t$ , tempo.

$$^{ii} R^2 = 0.72$$

- $R^2$ , coefficiente di correlazione (*Allegato A*).

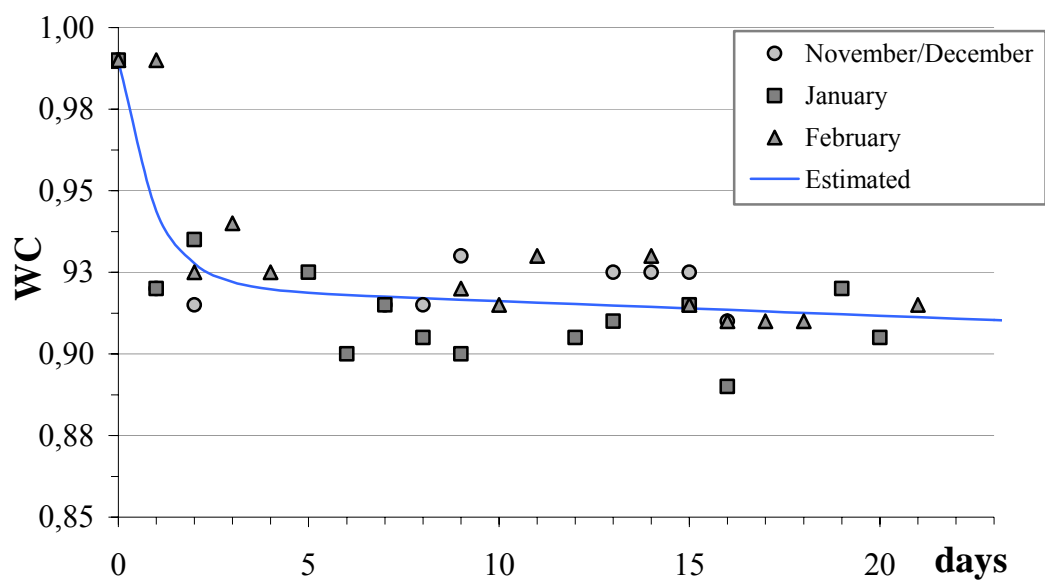


Figura 32-Equazione stimata/ dati misurati.

L'errore assoluto calcolato tra i dati misurati e quelli stimati dall'equazione si attesta in un intervallo compreso tra  $\pm 0.03$  come mostrato dalla figura 33.

<sup>ii</sup>  $R^2$  vedere per il calcolo allegato A

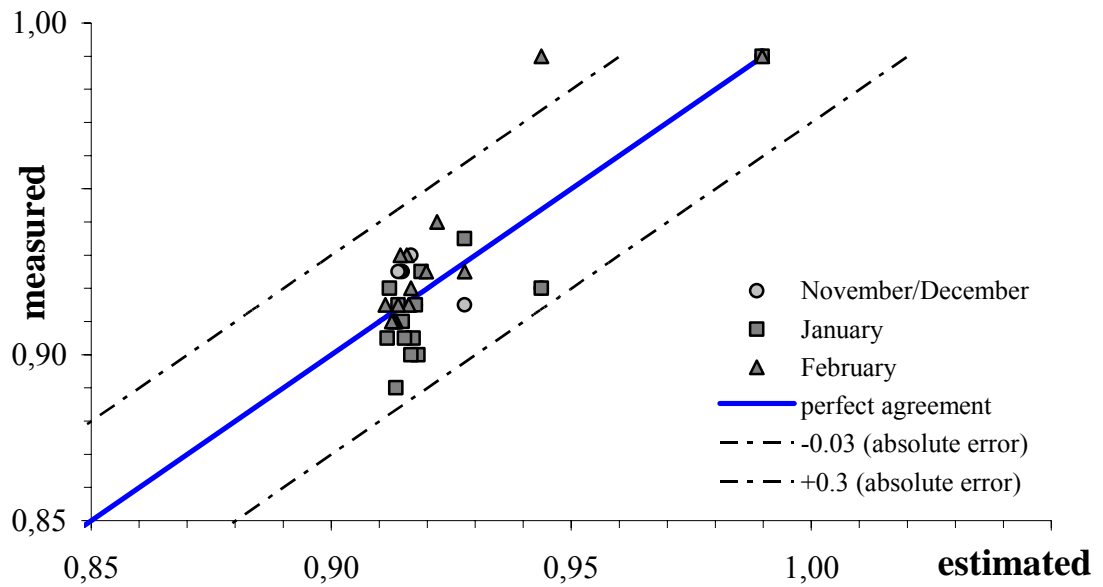


Figura 33-Intervallo d'errore tra dati stimati e misurati.

#### 4.3.2 Equazione misurazione estiva

In maniera del tutto analoga si è proceduto ad analizzare i dati della campagna estiva.

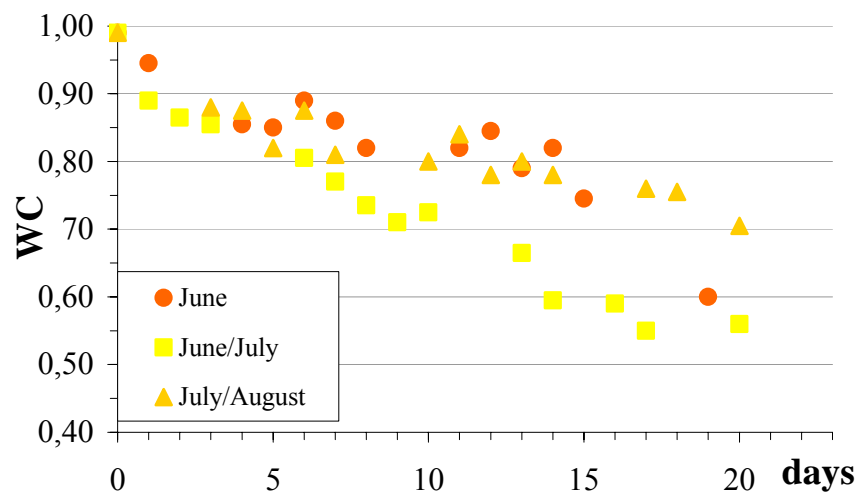


Figura 34.-Dati campagna estiva

Calibrando i dati l'equazione che si ottiene è:

$$WC_t = 0.07 * e^{-1.0772 \cdot t} + 0.92 * e^{-0.0171 \cdot t}$$

- $WC_t$ , contenuto d'acqua al variare del tempo.
- $t$ , tempo.

$$R^2 = 0.69$$

- $R^2$ , coefficiente di correlazione (*Allegato A*).

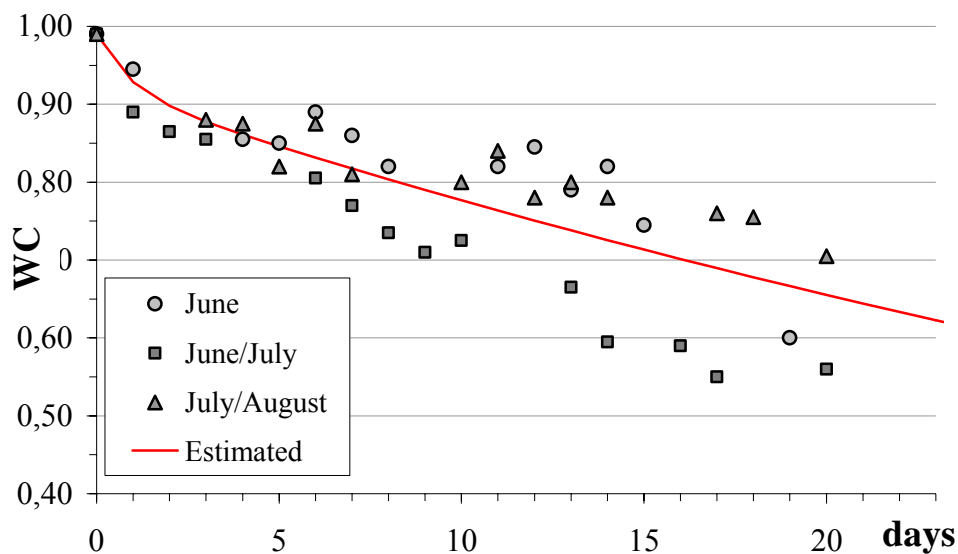


Figura 35-Equazione stimata/dati misurati.

In questo caso i valori stimati rispetto a quelli misurati si attestano in un errore assoluto pari a  $\pm 0.15$  come possiamo mostra la figura 36.

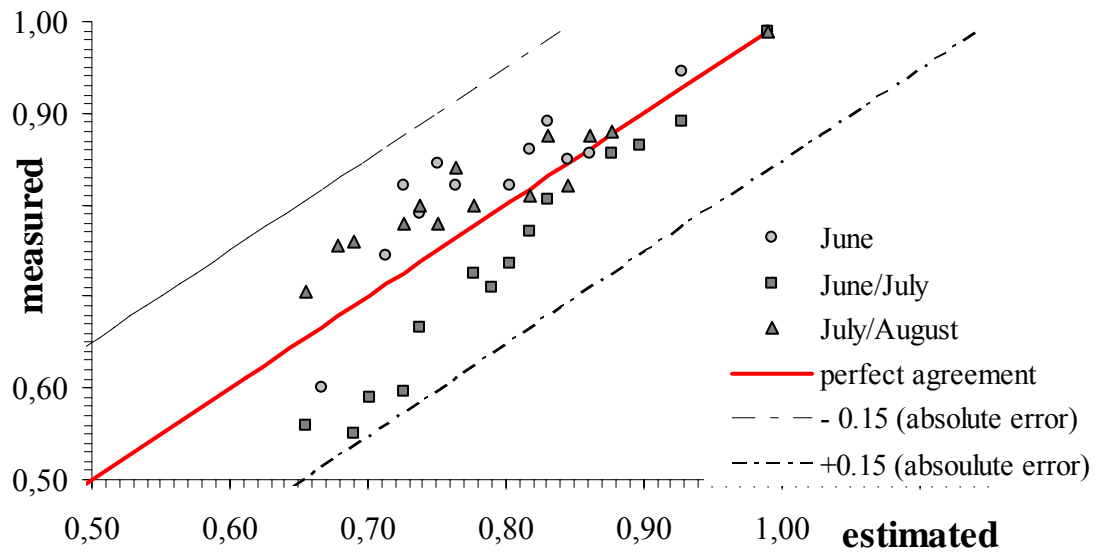


Figura 36-Intervallo d'errore tra dati stimati e misurati.

### 4.3.3 Confronti tra le due equazioni

Confrontando le due equazioni si nota che hanno gli stessi parametri (A, b) legati al primo esponente e che descrivono, come detto, il fenomeno di drenaggio indipendente dalle differenze stagionali.(figura 37)

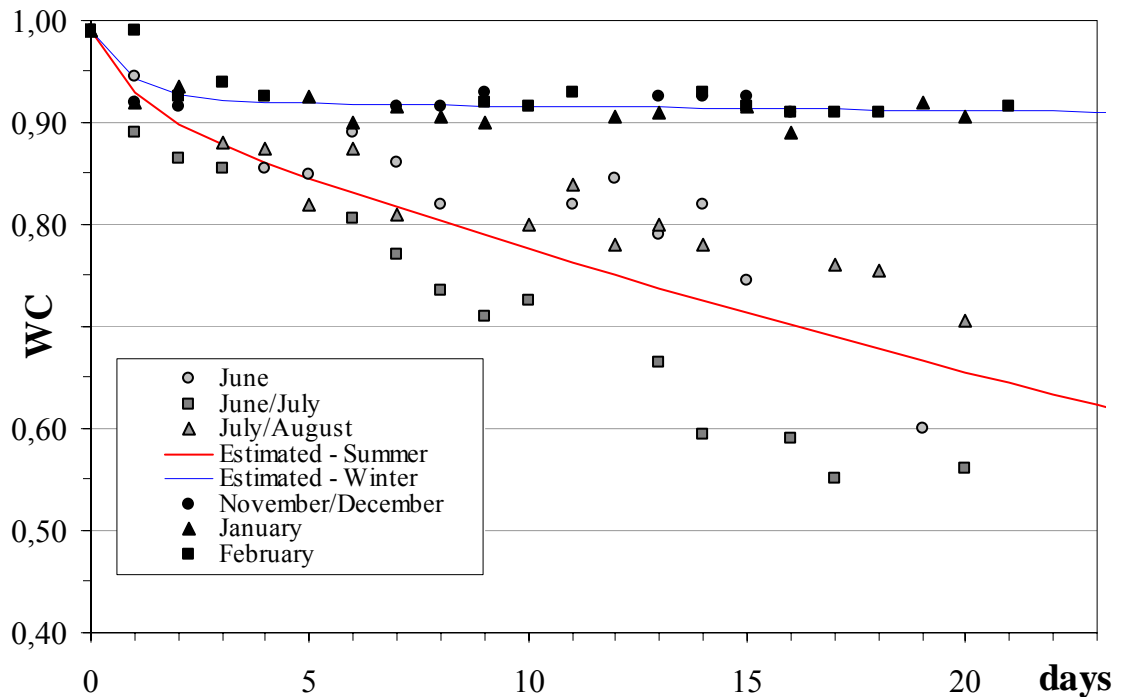


Figura 37-Equazioni stimate e dati a confronto.

$$WC_t = 0.07 * e^{-1.0772 \cdot t} + 0.92 * e^{-0.0005 \cdot t}$$

$$WC_t = 0.07 * e^{-1.0772 \cdot t} + 0.92 * e^{-0.0171 \cdot t}$$

- $WC_t$ , contenuto d'acqua al variare del tempo.
- $t$ , tempo.

Il secondo esponente è legato alle condizioni meteo-climatiche, il parametro che variabile risulta  $d$ .

Si è già ampiamente fatto notare che in inverno l'evapotraspirazione ET è del tutto trascurabile, la presenza comunque di questo esponente si può spiegare a causa degli effetti fisico-meccanici che le piantine esercitano sulla capacità disidratativi dei fanghi.

## 4.4 Elementi progettuali

Partendo dall'analisi delle equazioni notiamo come un tempo di giacenza elevato dei fanghi nelle vasche consente, soprattutto nel periodo estivo, elevati gradi di disidratazione. Al contrario in inverno il protrarsi dei tempi di giacenza dei fanghi non porta ad evidenti benefici nel contenuto d'acqua.

Accanto a queste annotazioni, si tenga presente, come tempi di giacenza lunghi portino ad avere necessità di un numero maggiore di letti e quindi di un aumento sia delle superfici sia dei costi di costruzione e di gestione.

È in considerazione delle osservazioni appena fatte che s'inquadra l'utilizzo delle equazioni (WC, t) che mirano a determinare l'optimum tra buon grado di stabilizzazione e disidratazione dei fanghi e contenimento di costi e superfici per la realizzazione di un impianto di fitomineralizzazione.

Per stabilire tali relazioni partiamo dall'equazione di bilancio:

$$Q_s * t = S * h_l$$

- $Q_s$ , portata di fango di supero ( $m^3/d$ )
- $t$ , intervallo di giacenza dei fanghi nei letti ( $d$ , giorni).
- $S$ , superficie dell'impianto di fitomineralizzazione ( $m^2$ ).
- $h_l$ , spessore massimo del fango sversato nei letti ( $m$ ).

Dall'espressione sopra è possibile ricavare S:

$$S = \frac{Q_s * t}{h_l}$$

Prendendo in considerazione ancora un'equazione di bilancio, sulla sostanza disidratata e quindi, sul legame tra spessore ottenuto al tempo  $t$  e condizioni WC si ha:

$$h_t = h_l * \frac{\gamma_0 * (1 - WC_0)}{\gamma_t * (1 - WC_t)}$$

- $h_t$ , altezza di fango nei letti al tempo  $t$  (m).
- $\gamma_0$ , peso specifico dei fanghi all'immissione nei letti ( $kg/m^3$ ).
- <sup>iii</sup>  $\gamma_t$ , peso specifico dei fanghi al tempo  $t$  ( $kg/m^3$ ).
- $WC_0$ , contenuto di umidità al tempo  $t=0$ .
- $WC_t$ , contenuto d'umidità al tempo  $t$ .

In ultimo si fornisce l'espressione che lega il tempo di vita del letto con l'altezza di bordo libero delle vasche. Con il procedere degli sversamenti infatti, si ha un residuo di fanghi che va ad accumularsi nei letti e che raggiunta la sommità costringe ad intervenire e ripulire.

$$T = \frac{H}{h_t} * t$$

- $T$ , vita utile del letto (d).
- <sup>iv</sup>  $H$ , altezza di bordo libero delle vasche (m).

L'equazione sopra fornisce la base da cui partire per stabilire l'altezza del bordo libero in funzione del tempo  $T$  dopo il quale sono previsti gli svuotamenti e i relativi ripristini dei letti.

Ipotizzando condizioni climatiche tipicamente estive o tipicamente invernali e quindi, impiegando una delle due equazioni trovate, si potrebbe ricavare, in funzione del ciclo di carico scelto, un'equazione legata all'aspettativa d'anni ed una connessa al calcolo delle di superficie necessarie.

---


$$\text{iii } \gamma_t = \frac{\gamma_w * \gamma_{ss}}{WC_t * \gamma_{ss} + (1 - WC_t) * \gamma_w} \text{ equazione per il calcolo del peso specifico } \gamma_t \text{ note le condizioni}$$

di umidità al tempo  $t$ .

<sup>iv</sup>  $H$ =si fa notare che l'altezza dipende d'altezza di accumulo nei letti che varia tra estate ed inverno per cui è funzione di entrambe le eq. determinate.



Riferendoci alla nostra esperienza e quindi, adottando un ciclo di carico paria  $t=21$  giorni le curve che si ottengono sono quelle descritte dalla figura 38.

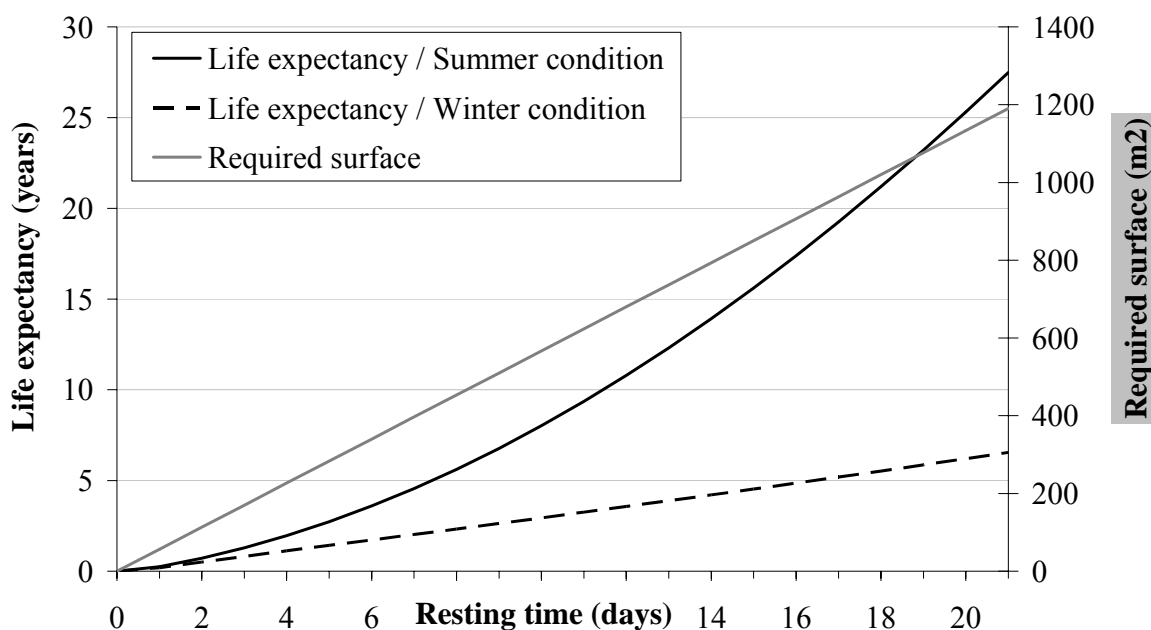


Figura 38-Curve tra cicli di carico, vita utile stimata e superfici necessarie.

Partendo dall'equazione sperimentale ( $WC, t$ ) è possibile determinare attraverso le espressioni sopra riportate, in funzione degli intervalli di carico, il miglior rapporto tra grado di disidratazione, superficie dell'impianto, altezza di bordo libero, vita utile del sistema e soprattutto costi di realizzazione.

Per completezza d'informazione si fa presente che, il nostro lavoro, si è concentrato solo sugli aspetti puramente fisici, tralasciando quelli chimici utili e necessari per esaminare il grado di stabilizzazione e mineralizzazione del fango prodotto.

Tali analisi risulterebbero necessarie ed opportune per poter meglio stabilire l'intervallo da dare al ciclo di carico in modo da garantire, accanto ad una buona disidratazione, una buona qualità chimica del fango.

## 4.5. Analisi dei costi

In accordo con le equazioni, possiamo osservare che da un punto di vista puramente economico i costi possono essere suddivisi in due categorie.

1.  $C_s = S * c_s$  Costi di costruzione, funzione della superficie dei letti.  
 $c_s$  costo per unità di superficie.

2.  $C_R = S * c_R \frac{T_L}{T}$  Costi relativi alla manutenzione dei letti funzione  
della superficie, del tempo T di vita utile e di  $T_L$   
tempo di vita del sistema.  
 $c_R$  costi di manutenzione per unità di superficie.

I costi di entrambe le tipologie sono funzione degli intervalli di tempo  $t$  con cui decidiamo di caricare le vasche.

Si nota che all'aumentare  $t$  cresce la superficie S di cui è necessario dotare l'impianto di disidratazione, mentre diminuisce l'accumulo di fango ispessito, per cui i valori legati a T diminuiscono.

Si può ipotizzare quindi l'esistenza di un valore ottimale di tempo  $t$  per cui i costi totali, somma dei due costi parziali, siano minimi.

Supponendo di prendere in considerazione condizioni estive, con valori teorici pari a:

- $C_s = 200 \text{ €/m}^2$
- $C_R = 100 \text{ €/m}^2$
- $T_L = 30 \text{ anni}$

Nella figura 39 sono riportate le curve relative ai costi:

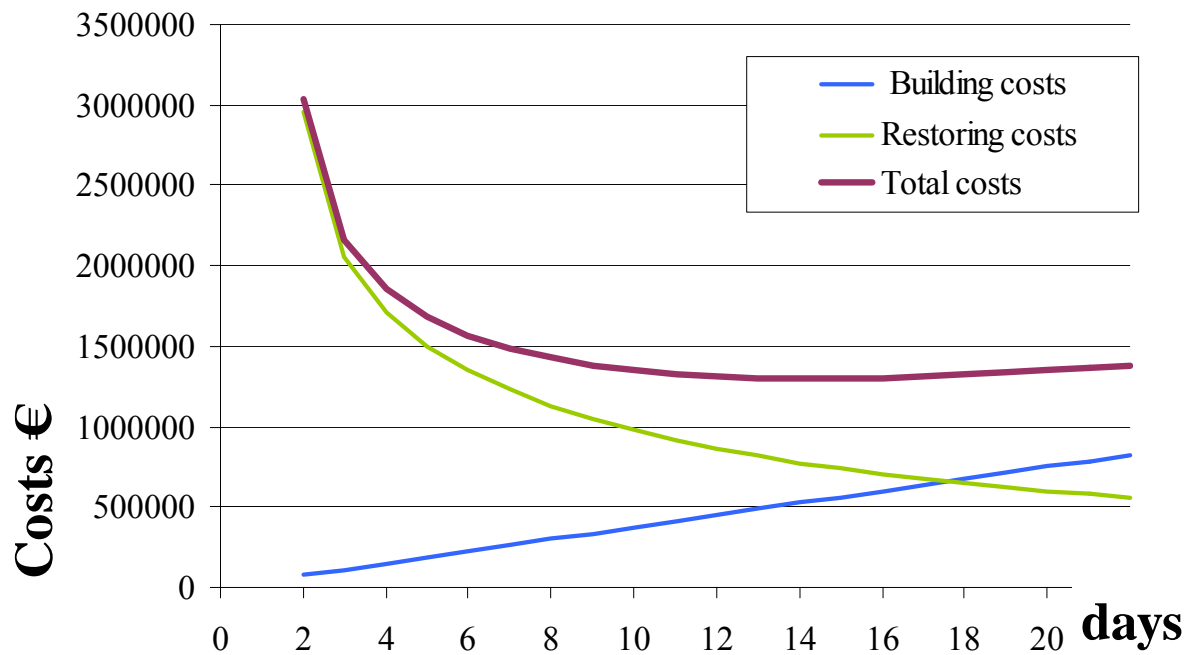


Figura 39-Curve dei costi in funzione del tempo.

Dalla figura si nota che il minimo della curva dei costi totali, si attesta per un valore di  $t=11d$ .

Si riporta in *Allegato B* un esempio di foglio di calcolo utilizzato per la determinazione dei diagrammi sopra riportati.

## ***Capitolo 5-Esperienza progettuale con Acque Spa***

La società Acque Spa in cooperazione con le sue controllate Acque Servizi srl ed Acque Ingegneria, sulla base delle sperimentazioni svolte, come detto, in collaborazione con la Facoltà di Ingegneria ed il C.N.R. sul processo di fitomineralizzazione dei fanghi ha deciso di investire un certo capitale per la trasformazione dei tradizionali letti di essiccamento in vasche di fitomineralizzazione.

L'intervento aveva tra gli obiettivi:

- economicità e semplicità di processo: i sistemi di fitoessiccamento presentano costi di costruzione e gestione enormemente inferiori a quelli necessari a realizzare un'intera linea fanghi tradizionale. Si vuole, infatti, rilevare che l'impianto di fitoessiccamento sostituisce l'intera linea fanghi realizzata in genere da diverse unità operative quali l'ispessitore, il digestore ed i dispositivi di disidratazione;
- applicabilità anche a scala ridotta: a causa degli alti costi, i sistemi di trattamento meccanici di tipo tradizionali in genere non si applicano ad impianti di modesta potenzialità. In tali casi si preferisce ricorrere ad un trattamento centralizzato *ex situ* che comporta, oltre naturalmente ad oneri aggiuntivi, anche la movimentazione di materiale settico con ovvi rischi ambientali;
- produzione di materiale idoneo alla preparazione di compost. La miscela costituita da fango mineralizzato e residuo vegetale di sfalcio è rimossa dai letti solo, quando essi sono saturi; la miscela fango-vegetale costituisce un'ottima matrice per il compostaggio che viene predisposto su una platea impermeabile o in vasca, all'impianto stesso se vi è spazio sufficiente.

Tra gli obiettivi dobbiamo elencare anche quelli legati all'ambiente:

- riduzione degli odori. La presenza e l'attività delle piante contribuisce all'abbattimento degli odori, in quanto loro innescano processi metabolici aerobici che degradano la sostanza organica labile stabilizzandola chimicamente e biologicamente.

- riduzione delle emissioni in atmosfera. Come tutti i processi di stabilizzazione biologica, anche questi letti vegetati producono emissioni gassose, costituite fondamentalmente da anidride carbonica e vapore acqueo. La CO<sub>2</sub> viene in parte ricatturata per fotosintesi dall'apparato fogliare delle piante e anche dalle radici (carbonatazione).
- Creazione di un ecosistema. La presenza delle piante porta alla formazione di un vero e proprio ecosistema con la presenza iniziale d'insetti e poi di volatili e piccoli animali.



**Figura 40-Presenza d'insetti nelle vasche piantumata.**

- Contenimento del trasporto dei fanghi. La frequente alimentazione dei letti di fitoessiccamento e l'importante riduzione del volume dei fanghi consente di ridurre i costi di trasporto che normalmente avviene "su gomma" appesantendo la viabilità in zone turistiche o abitate, e compromettendo la qualità dell'aria.

## **5.1 Determinazione dei siti**

Il primo passo è stato quello di selezionare, tra tutti i possibili depuratori dotati di vecchi letti di essiccamento, quelli che risultassero più vantaggiosi allo scopo della sperimentazione.

La scelta è ricaduta, come prima cosa, su impianti di piccole dimensioni dove la produzione di fango risultava contenuta e dove quindi, si poteva supporre, di trattarli completamente all'interno delle vasche di fitodisidratazione, abbattendo fortemente i costi di smaltimento.

Altro elemento di scelta è stato comprendere depuratori che risultassero situati in zone difficilmente agibili con camion botti per cui l'utilizzo di tali letti consentiva alla gestione di dilazionare e diminuire il numero di interventi necessari ad allontanare i fanghi dall'impianto.

Si è poi dato risalto all'aspetto ambientale, con la scelta d'impianti collocati a ridosso o addirittura all'interno dei centri abitati, questo non solo per ridurre, come detto, gli odori ma anche per consentire un miglior inserimento paesaggistico.

In ultimo si sono introdotti depuratori per cui a tempi medio-brevi si prevedeva la dismissione, questa scelta che può risultare anormale si basa sulla considerazione che i costi di trasformazione legati a questo intervento risultano comunque piuttosto contenuti rispetto ai costi legati al trattamento dei fanghi. Inoltre si è tenuto conto che la dismissione dell'impianto si è ipotizzata coincidente con la fine d'esercizio dei letti, quindi si elidono tutti gli interventi ed i costi necessari alla corretta manutenzione delle vasche.

In conformità a quanto detto gli impianti che sono rientrati nella sperimentazione sono elencati nella Tabella 12:

<b>Impianto</b>	<b>N° letti</b>	<b>S Superfici e totale</b>	<b>V Volume totale</b>	<b>Q<sub>1</sub> Quantità di fango liquido estratto e spesso trasportato su altri impianti</b>	<b>Q<sub>2</sub> Quantità di fango liquido trattabile in fitomineralizzazione (Valore medio)</b>	<b>Q<sub>3</sub> Quantità di fango disidratato</b>
		m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> Kg	10 <sup>3</sup> Kg	10 <sup>3</sup> Kg
Baccane	2	64	64	3395.0	249.6	
Bientina	6	300	180	842.0	1170.0	67.4
Cambiano	4	750	600	0.0	2925.0	
Cenaia	2	49	30	1508.0	191.1	120.6
Chianni	2	88	53	467.0	343.2	37.4
Intercomunale	2	260	260	298.4	1014.0	
*La Fontina	12	360	216	6652.0	1404.0	532.3
*La Rotta	4	100	70	400.0	390.0	32.0
Cascine di Buti	2	140	133	198.0	546.0	15.8
Luciana	2	140	133	25.0	546.0	2.0
Oratoio	5	375	225	2758.0	1462.5	220.6
Stabbia	1	64	64	454.0	250.8	
Valtriano	2	140	133	198.0	546.0	15.8
Momigno	2	180	108	836.0	702.0	823.0

**Tabella 12-Elenco e caratteristiche degli impianti scelti.**

Nella *tabella 12* sono indicati nell'ordine, gli impianti, il numero di letti disponibili, la superficie, il volume, il fango liquido prodotta che, spesso è trasferito su altro impianto per i successivi trattamenti, il fango liquido da avviare al processo di fitomineralizzazione (valore medio stimato) e il fango disidratato prodotto da ciascun impianto; questi ultimi valori sono indicati su base annua.

\*Si fa osservare che nell'elenco appaiono elencate sia il depuratore La Fontina sia quello della Rotta, questi appaiono perché sebbene essi siano stati già convertiti in un sistema di fitodisidratazione, si prevede in ogni modo di apportare delle modifiche strutturali tra cui, ad esempio aumentare il bordo libero disponibile ed in entrambi casi insufficienti a protrarre i cicli di carico per lunghi periodi.

## 5.2 Fasi costruttive

Iniziare un processo di fitomineralizzazione che coinvolga contemporaneamente tutti i siti indicati in precedenza presenta diverse difficoltà da vari punti di vista, come ad esempio problemi logistici ed organizzativi, oltre ad un impegno economico rilevante come investimento.

Come prima fase sono stati selezionati quattro impianti in modo da contenere l'investimento, monitorare accuratamente il processo al fine di ottimizzarlo al massimo in modo da ottenere un giusto rapporto tra i costi ed i benefici.

Gli impianti sono:

- La Luciana.
- Bientina
- Cascine di Buti
- La Rotta.

Le lavorazioni hanno previsto tutta una serie di attività programmate che in ordine risultano:

1. Pulitura letti.
2. Ripristini ed opere murarie.
3. Scelta e costruzione filtro drenante.
4. Opere di piping e piantumazione.
5. Messa in esercizio.

### 5.2.1.Pulizia letti

Prima di procedere è stato necessario, operare una pulizia totale dei vecchi letti di essiccamento.(Figura 41)

In alcuni di essi spesso, in situazioni d'emergenza, la gestione aveva versato parte dei fanghi che non era riuscita ad allontanare o a trattare in altro modo.

Tale operazione è stata eseguita da Acque Industriale, l'altra controllata di Acque, con camion botti e/o mezzi meccanici in grado di prelevare i fanghi e portare tali



sostanze, altamente inquinanti, a discarica o in opportuni centri per il loro completo smaltimento.



Figura 41-Condizione iniziale dei letti

### 5.2.2.Opere murarie

In questa fase si è fornita una consulenza tecnica ad Acque Servizi che, attraverso uomini e mezzi, ha realizzato le modifiche necessarie per dar vita al sistema di fitomineralizzazione.

Sulle base di quanto ritrovato anche in letteratura, si è provveduto in prima battuta a recuperare le murature, infatti come si nota anche dalla *figura 42* in molte parti il cls era in pessimo stato e si intravedevano i ferri dell'armatura, questa operazione era necessaria non solo per motivi strutturali ma anche per garantire una perfetta impermeabilizzazione delle vasche.

È facile immaginare il grave danno ambientale a cui s'incorrerebbe nel caso in cui il percolato del fango filtrasse nel terreno.

Successivamente si sono rialzate, dove necessario, i muri perimetrali fino a raggiungere un'altezza utile (bordo libero) di 1-1,10 m.

Questa scelta è stata presa per incrementare i volumi di accumulo utile. *Figura 43.*



**Figura 42-Condizione muratura prima ristrutturazione**



**Figura 43-Condizioni muratura a ristrutturazione avvenuta**

Si è lasciata una zona d'accesso, chiusa mediante portellone zincato (*figura 44*), per consentire un più comodo accesso, per motivi manutentivi, ad un piccolo mezzo meccanico.



**Figura 44-Portellone zincato.**

### 5.2.3.Scelta dello strato drenante

Per lo strato drenante, sulla base anche dell'esperienza fatta al depuratore La Fontina si è deciso di utilizzare un doppio strato di ghiaia del tipo:

1. **zona più profonda della vasca**-spessore 20 cm, granulometria 4/7mm

2. **zona superficiale della vasca**- spessore 20 cm , granulometria 1mm

In questa fase è stato opportuno acquistare del materiale lapideo quanto più “pulito” possibile, la presenza di materiale di scarto poteva, infatti, risultare molto nocivo per il buon funzionamento del filtro.(Figura45).



Figura 45-Medium letto ristrutturato

### 5.2.4.Opere di piping e piantumazione

L'ultima fase costruttiva è stata quella di dotare il sistema di nuovi e più adeguati sistemi di alimentazione *visto* il pessimo stato di quelli esistenti (Figura46).

Oltre a dotare i letti di nuove saracinesche a palla cuneo gommato con volantino, si è fatta anche una verifica sullo stato delle condotte di alimentazione e di uscita dalle vasche. (Figura47).



**Figura 46-Sistema distribuzione fango prima dell'intervento di ristrutturazione**



**Figura 47-Sistema di distribuzione fango a ristrutturazione avvenuta**

Per facilitare la gestione dei fanghi in eccesso, si è aggiunto ad una linea d'alimentazione, una saracinesca con attacco rapido per espurgo, questo per dare facoltà di prelevare direttamente i fanghi in eccedenza con camion botti e smaltirli *ex situ*.

In ultimo abbiamo messo a dimora le piantine di *Phragmites* ad una distanza le une dalle altre di 50 cm.

### **5.2.5.Messa in esercizio**

Si è dato supporto tecnico anche nella fase di messa in esercizio dell'impianto. Questo stadio risulta uno dei momenti più critici e delicati, infatti un'errata alimentazione può portare come conseguenza la perdita delle piantine e. È proprio subito dopo la piantumazione che l'essenza richiede maggior attenzione, una volta adeguata alle condizioni ambientali cresce e prolifera con molta rapidità e non ha più necessità di grossi accorgimenti.

I punti più critici sono essenzialmente due.



1. la necessità di tenere le radici sempre umide cosa non facile se consideriamo che sono posate in un filtro drenante.
2. dosare in maniera adeguata le prime immissioni di liquame.

Per superare il primo problema si è provveduto, quando era possibile, a chiudere l'uscita dei letti con palloni da fognatura. Fatta quest'operazione si sono allagati completamente i letti con acqua.

Il secondo aspetto è risultato più complesso da gestire infatti, era necessario sversare piccole quantità di fango che alimentassero le piante abituandole al tipo di ambiente senza danneggiarle.

Non essendo prevista una metodica si è utilizzato il buon senso e la buona volontà degli operatori che lavorano sugli impianti. *Figura 48*).



**Figura 48-Piantumazione e periodo iniziale di caricamento.**

### **5.3. Osservazione**

Ad oggi già una buona parte degli impianti elencati nella *Tabella 12* risultano attivi e funzionanti e parte degli obiettivi prospettati risultano centrati.

Si fa notare che questi sistemi rappresentano una buona base per ricerche sperimentali a scala reale.

La scelta di depuratori differenti tra loro sia come gestione sia come tipologia di fango potrebbe aprire la strada a raffronti tra grado di disidratazione e mineralizzazione ottenuta con tutta una serie di parametri monitorabili legati al tipo d'impianto, alla qualità del fango da trattare e perché no alla dislocazione geografica del depuratore stesso.

## ***Capitolo 6-Conclusioni e prospettive future***

Dalla prima parte del nostro lavoro, relativo all'analisi del processo di disidratazione dei fanghi nel breve periodo, si sono evidenziati i seguenti aspetti:

- La campagna di raccolta dati nel periodo estivo, ha mostrato come, il processo di disidratazione, risulti significativo nelle prime tre settimane con la possibilità di raggiungere anche il 40% della riduzione di contenuto d'acqua nei fanghi grazie, soprattutto, all'intervento dell'evapotraspirazione. Mentre, durante il periodo invernale la riduzione, che si presenta principalmente nella prima settimana, resta molto contenuta circa 8% e ciò può essere imputabile alla mancanza, pressoché totale, dell'effetto evapotraspirante.
- La presenza delle piante consente, in inverno, anche se in maniera ridotta, di creare condizioni tali da garantire comunque una diminuzione del contenuto d'acqua, condizione che invece non si ottiene, come abbiamo testato, nella vasca priva di essenze dove, in questo stadio non è stato possibile effettuare nessun prelievo. Questa forte differenziazione è imputabile a tutta quella serie di processi fisico-meccanici che la presenza dei vegetali attua.
- La determinazione e calibrazione dell'equazione tra contenuto d'acqua e cicli di carico, (WC,t) per poter descrivere il processo di disidratazione nei fanghi. La relazione ci fornisce un legame tra grado di disidratazione, vita utile dei letti e superfici necessarie, rappresentando uno strumento valido per la progettazione di questi sistemi.
- Dall'equazione è possibile determinare anche il valore da dare alla durata dei cicli di carico per poter minimizzare sia i costi di realizzazione sia quelli di manutenzione.

La seconda parte del nostro studio, quella in collaborazione con l'azienda Acque spa, ci ha consentito di dare indicazioni progettuali per la trasformazione di vecchi letti di essiccamento in vasche di fitomineralizzazione. Mettendo in luce tutte quelle problematiche costruttive che possono sorgere.

In conformità a quanto è emerso, ed in funzione di quelle che possono essere le prospettive future, questo lavoro può rappresentare la base da cui partire per ampliare le ricerche nel breve periodo.

Si potrebbe ipotizzare di fare studi non solo fisico-dinamico ma anche analisi chimico-biologiche che forniscano indicazioni sulla qualità del fango ottenuto da affiancare al grado di disidratazione misurato.

Aver poi convertito un buon numero di depuratori, differenti tra loro per posizione geografica, qualità del liquame da trattare e tipo di gestione, in sistemi di fitomineralizzazione potrebbe rappresentare la base per studi che hanno come obbiettivo quello di trovare una corrispondenza tra la qualità di fango raggiunta e le diverse tipologie d'impianto.



## Bibliografia

- **Burgoon, Kirkbride, Henderson, Landon (1997).** *Reed beds for biosolids drying in the arid northwestern United States.* Wat.Sci.Tech.,vol.35, No. 5, pp. 287-292.
- **De-Maeseneer (1997).** *Costructed wetlands for sludge dewatering.* Wat.Sci.Tech.,vol.35, No. 5, pp. 279-285.
- **Garuti.** Atti “*II Scuola Nazionale trattamenti naturali acque reflue*”, Firenze, 7-10/luglio/2003
- **Liénaed, Duchène, Gorini (1995).** *A study of activated sludge dewatering in experimental reed-planted or unplanted sludge drying beds.* Wat.Sci.Tech.,vol.32, No. 3, pp. 251-261.
- **Nassar, Smith, Afifi (2006).** *Sludge dewatering using the reed bed system in the Gaza Strip, Palestine.* Water and Environment Journal, No. 20, pp. 27-34.
- **Nielsen (2003).** *Sludge drying reed beds.* Wat.Sci.Tech.,vol.48, No. 8, pp. 101-109
- **Nielsen (2006).** *Sludge reed bed facilities :operation and problems.* Wat.Sci.Tech.,vol.51, No. 9, pp. 99-107
- **Nielsen (1993).** *Biological sludge drying in constructed wetlands in Construed Wetland for Water Quality Improvement .* G.A. Moshin, pp. 549-558, Lewis Publishers.

- **D. Giraldi, R. Iannelli, F. Lucarini (2005).** *L'evapotraspirazione ed il bilancio idrico dei sistemi di fitodepurazione: valutazione teorica e sperimentale.* Dipartimento di ingegneria università di Pisa, Pisa.
- **Masciandaro et al.(2006).** *Chiusura del ciclo di depurazione delle acque reflue civili mediante trattamento di fitostabilizzazione dei fanghi.*
- **Kim, Smith (1997).** *Evaluation of sludge dewatering reed beds: a niche for small systems.* Wat.Sci.Tech.,vol.35, No. 6, pp. 21-28.
- **Murray R. Spiegel (1987).** *Statistica.* Collana Schaum, McGraw-hill Editore.
- **A. Colombo (2007).** *Utilizzo razionale e sostenibile dei fanghi di depurazione, Volume 2.* IRER, Milano giugno 2007.
- **P. Chiappella, C. Cortemiglia, G. Garuti (2006).** *Esperienze di fitodisidratazione dei fanghi di depurazione di un'azienda vinicola.* L'ambiente 5/03, Tecnologie applicate.
- **E. Huertas, D. Güell, M. Folch et al.(2004).** *Reed beds for sludge dewatering in Catalonia ( Spain)*
- **Barbieri A., Garuti G., Avolio F., Bruni S. (2003).** *Sludge dewatering using macrophytes in a small wastewater treatment system: a case study of a pilot scale plant in northern Italy.* J. Environ. Sci. Heal. A 38 (10), 2425-2433.
- **Begg J.S., Lavigne R.L., Veneman P.L.M. (2001).** *Reed beds: constructed wetlands for municipal wastewater treatment plant sludge dewatering.* Wat. Sci. Tech. 44 (11-12), 393-398.

- **Edwards J.K., Gray K.R., Cooper D.J., Biddlestone A.J., Willoughby N. (2001).** *Reed bed dewatering of agricultural sludges and slurries*. Wat. Sci. Tech. 44 (11-12), 551-558.
- **Priestley C.H.B., Taylor R.J. (1972).** *On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters*. Monthly Weather Review 100, 81-92.
- **L.Masotti, p.Verlicchi (2005).** *Depurazione delle acque di piccole comunità*. Ulrico Hoepli Editore.

## ***Allegato A-equazione WC/t analisi statistica***

Si danno qui alcuni cenni su come si sia operato per stabilire la correlazione ,cioè il grado di relazione tra variabili, in modo da stabilire quanto bene un'equazione descriva o spieghi il rapporto tra le variabili.

Quando i valori delle variabili soddisfano in modo esatto l'equazione si ha una correlazione perfetta. Se invece non esiste nessun tipo d'attinenza tra i valori, si che questi sono in correlati.

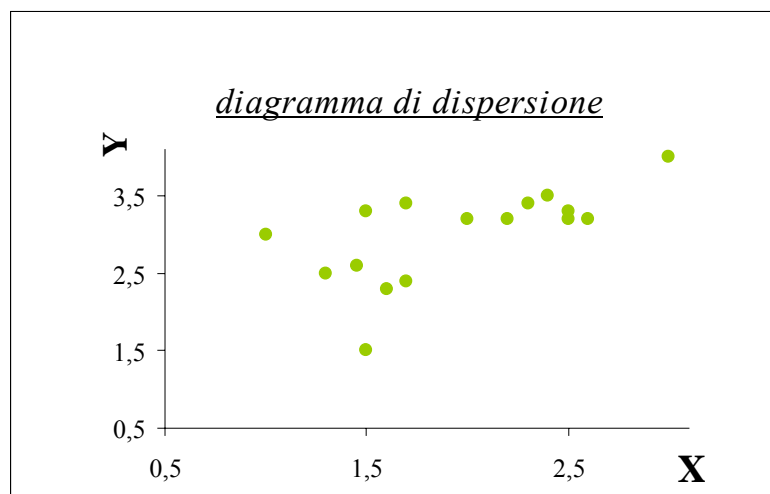
Parliamo di:

- *Correlazione semplice* quando sono presenti solo due variabili.
- *Regressione multipla* quando le variabili sono superiori a due.

Nel nostro caso la correlazione è di tipo semplice.

### **Correlazione semplice:**

Si indichi con X e Y le due variabili considerate e tracciamo il *diagramma di dispersione* semplicemente riportando su di un piano cartesiano la coppia di punti da correlare (X;Y):



Se tutti i punti si dispongono secondo:

- una retta parliamo di correlazione lineare
- una curva la correlazione è detta non lineare e in questo caso è necessario determinare l'equazione che meglio si adatta a tali valori.
- non ho curve cioè non esiste correlazione diciamo che i dati sono in correlati per cui non è possibile trovare alcuna relazione che li metta in corrispondenza.

La bontà dell'attinenza tra dati ed equazione può essere determinata in prima battuta in maniera qualitativa attraverso la semplice osservazione diretta del diagramma di dispersione.

Se il problema deve invece essere trattato in modo quantitativo è necessario far uso di alcune *misure di correlazione* tra cui una delle più adottate il **metodo dei minimi quadrati**.

### **Metodo dei minimi quadrati.**

Se indichiamo con  $Y_{stim}$  il valore di  $Y$  per dati valori di  $X$  secondo una nostra stima, una misura della dispersione intorno alla nostra curva è data da:

$$S_{Y,X} = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_{stim})^2}{N}} \quad (*)$$

Definito come errore standard della stima di  $Y$  su  $X$ .

Analogo errore se stiamo considerando  $X_{stim}$  valore di  $X$  per dati valori di  $Y$ .

$$S_{X,Y} = \sqrt{\frac{\sum (X - X_{stim})^2}{N}}$$

Si osservi che in generale risulta  $S_{Y,X} \neq S_{X,Y}$ .

S'indica con devianza totale di  $Y$  la somma dei quadrati degli scarti dei valori  $Y$  dalla media  $Y_{med}$  che si ricava come:

$$D_{tot} = \sum Y^2$$

Dove:

$$Y = Y_{stim} - Y_{med}$$

$Y_{med}$  rappresenta il valore medio dei valori misurati o stimati  $Y_{stim}$ .

Si dice devianza spiegata di  $Y$  il valore ottenuto come sommatoria del quadrato tra la differenza tra i valori stimati e il valore medio cioè:

$$\sum (Y_{stim} - Y_{med})^2$$

Il rapporto tra devianza spiegata e devianza totale si dice coefficiente di determinazione e si indica con  $R^2$  e si ricava come:

$$R^2 = \frac{\sum (Y_{stim} - Y_{med})^2}{\sum Y^2}$$

In base a quanto visto in precedenza  $R^2$  si può anche scrivere utilizzando la (\*):

$$R^2 = \frac{\sum Y^2 - \sum N \cdot S_{yx}^2}{\sum Y^2}$$

Si può osservare che se la devianza spiegata (numeratore) si annulla il valore di  $R^2$  diventa zero invece la devianza totale (denominatore) acquisisce lo stesso valore di quella spiegata allora il valore della frazione diventa pari ad uno, quindi il coefficiente di determinazione ha valori compresi tra zero ed uno da qui l'utilizzo come definizione di  $R^2$

$$0 \leq R^2 \leq 1$$

Una volta determinato il coefficiente di determinazione possiamo determinare il **coefficiente di correlazione  $r$** :

$$r = \pm \sqrt{R^2}$$

$$-1 \leq r \leq +1$$

**$r$**  è un valore non dimensionale e misura la bontà dell'adattamento dell'equazione considerata ai dati. Più  **$r$**  è prossimo allo zero tanto più la nostra correlazione risulta insufficiente e l'equazione trovata non soddisfacente.

Vasca piantumata periodo invernale																		
giorni	Novembre/Dicembre						Gennaio						Febbraio					
	Y <sub>mis</sub>	Y <sub>stim</sub>	y=Y <sub>mis</sub> -Y <sub>m</sub>	y <sup>2</sup>	S <sub>y.x</sub> =Y <sub>mis</sub> -Y <sub>stim</sub>	N*S <sup>2</sup>	Y <sub>mis</sub>	Y <sub>stim</sub>	y=Y <sub>mis</sub> -Y <sub>m</sub>	y <sup>2</sup>	S <sub>y.x</sub> =Y <sub>mis</sub> -Y <sub>stim</sub>	N*S <sup>2</sup>	Y <sub>mis</sub>	Y <sub>stim</sub>	y=Y <sub>mis</sub> -Y <sub>m</sub>	y <sup>2</sup>	S <sub>y.x</sub> =Y <sub>mis</sub> -Y <sub>stim</sub>	N*S <sup>2</sup>
0	0,99	0,99	0,0630	0,0040	0,0002	0,0000	0,99	0,99	0,0732	0,0054	0,0002	0,0000	0,99	0,99	0,0596	0,0036	0,0002	0,0000
1	0,92	0,94	-0,0070	0,0000	-0,0237	0,0006	0,92	0,94	0,0032	0,0000	-0,0237	0,0006	0,99	0,94	0,0596	0,0036	0,046	0,0021
2	0,92	0,93	-0,0120	0,0001	-0,0128	0,0002	0,94	0,93	0,0182	0,0003	0,0072	0,0001	0,93	0,93	-0,0054	0,0000	-0,0028	0,0000
3													0,94	0,92	0,0096	0,0001	0,0180	0,0003
4													0,93	0,92	-0,0054	0,0000	0,0052	0,0000
5							0,93	0,92	0,0082	0,0001	0,0063	0,0000						
6							0,90	0,92	-0,0168	0,0003	-0,0181	0,0003						
7	0,92	0,92	-0,0120	0,0001	-0,0025	0,0000	0,92	0,92	-0,0018	0,0000	-0,0025	0,0000						
8	0,92	0,92	-0,0120	0,0001	-0,0021	0,0000	0,91	0,92	-0,0118	0,0001	-0,0121	0,0001						
9	0,93	0,92	0,0030	0,0000	0,0134	0,0002	0,90	0,92	-0,0168	0,0003	-0,0166	0,0003	0,92	0,92	-0,0104	0,0001	0,0034	0,0000
10													0,92	0,92	-0,0154	0,0002	-0,0012	0,0000
11													0,93	0,92	-0,0004	0,0000	0,0143	0,0002
12							0,91	0,92	-0,0118	0,0001	-0,0103	0,0001						
13	0,93	0,91	-0,0020	0,0000	0,0102	0,0001	0,91	0,91	-0,0068	0,0000	-0,0048	0,0000						
14	0,93	0,91	-0,0020	0,0000	0,0106	0,0001							0,93	0,91	-0,0004	0,0000	0,0156	0,0002
15	0,93	0,91	-0,0020	0,0000	0,0111	0,0001	0,92	0,91	-0,0018	0,0000	0,0011	0,0000	0,92	0,91	-0,0154	0,0002	0,0011	0,0000
16	0,91	0,91	-0,0170	0,0003	-0,0035	0,0000	0,89	0,91	-0,0268	0,0007	-0,0235	0,0006	0,91	0,91	-0,0204	0,0004	-0,0035	0,0000
17													0,91	0,91	-0,0204	0,0004	-0,0030	0,0000
18													0,91	0,91	-0,0204	0,0004	-0,0026	0,0000
19							0,92	0,91	0,0032	0,0000	0,0079	0,0001						
20							0,91	0,91	-0,0118	0,0001	-0,0067	0,0000						
21													0,92	0,91	-0,0154	0,0002	0,0037	0,0000
	Media dati misurati ym			Σy <sup>2</sup>		ΣN*s <sup>2</sup> <sub>y.x</sub>	Media dati misurati ym			Σy <sup>2</sup>		ΣN*s <sup>2</sup> <sub>y.x</sub>	Media dati misurati ym			Σy <sup>2</sup>		ΣN*s <sup>2</sup> <sub>y.x</sub>
	0,93			0,0048		0,0013	0,92			0,0075		0,0022	0,93			0,0091		0,0030
	Devianza spiegata Σy <sup>2</sup> -ΣN*s <sup>2</sup> <sub>y.x</sub>					0,0035	Devianza spiegata Σy <sup>2</sup> -ΣN*s <sup>2</sup> <sub>y.x</sub>					0,0053	Devianza spiegata Σy <sup>2</sup> -ΣN*s <sup>2</sup> <sub>y.x</sub>					0,0061
	Coeff. di determinazione r <sup>2</sup>					0,73	Coeff. di determinazione r <sup>2</sup>					0,71	Coeff. di determinazione r <sup>2</sup>					0,72
	coeff.di correazione √(r <sup>2</sup> )					0,8565	coeff.di correazione √(r <sup>2</sup> )					0,8415	coeff.di correazione √(r <sup>2</sup> )					0,8485
	coeff.di correazione √(r <sup>2</sup> )%					85,6519	coeff.di correazione √(r <sup>2</sup> )%					84,1474	coeff.di correazione √(r <sup>2</sup> )%					84,8528



Vasca piantumata periodo estivo

giorni	Giugno						Giugno/Luglio						Luglio/Agosto					
	Y <sub>mis</sub>	Y <sub>stim</sub>	y=Y <sub>mis</sub> -Y <sub>M</sub>	y <sup>2</sup>	S <sub>y,x</sub> =Y <sub>mis</sub> -Y <sub>stim</sub>	N*S <sup>2</sup>	Y <sub>mis</sub>	Y <sub>stim</sub>	y=Y <sub>mis</sub> -Y <sub>M</sub>	y <sup>2</sup>	S <sub>y,x</sub> =Y <sub>mis</sub> -Y <sub>stim</sub>	N*S <sup>2</sup>	Y <sub>mis</sub>	Y <sub>stim</sub>	y=Y <sub>mis</sub> -Y <sub>M</sub>	y <sup>2</sup>	S <sub>y,x</sub> =Y <sub>mis</sub> -Y <sub>stim</sub>	N*S <sup>2</sup>
0	0,99	0,99	0,16	0,02	0,00	0,0000	0,99	0,99	0,25	0,06	0,00	0,0000	0,99	0,99	0,17	0,03	0,00	0,0000
1	0,95	0,93	0,11	0,01	0,02	0,0003	0,89	0,93	0,15	0,02	-0,04	0,0015						
2							0,87	0,90	0,13	0,02	-0,03	0,0011						
3							0,86	0,88	0,12	0,01	-0,02	0,0005	0,88	0,88	0,06	0,00	0,00	0,0000
4	0,86	0,86	0,02	0,00	-0,01	0,0000							0,88	0,86	0,06	0,00	0,01	0,0002
5	0,85	0,85	0,02	0,00	0,00	0,0000							0,82	0,85	0,00	0,00	-0,03	0,0007
6	0,89	0,83	0,06	0,00	0,06	0,0034	0,81	0,83	0,07	0,00	-0,03	0,0007	0,88	0,83	0,06	0,00	0,04	0,0019
7	0,86	0,82	0,03	0,00	0,04	0,0018	0,77	0,82	0,03	0,00	-0,05	0,0022	0,81	0,82	-0,01	0,00	-0,01	0,0001
8	0,82	0,80	-0,01	0,00	0,02	0,0003	0,74	0,80	0,00	0,00	-0,07	0,0047						
9							0,71	0,79	-0,03	0,00	-0,08	0,0064						
10							0,73	0,78	-0,01	0,00	-0,05	0,0027	0,80	0,78	-0,02	0,00	0,02	0,0005
11	0,82	0,76	-0,01	0,00	0,06	0,0032							0,84	0,76	0,02	0,00	0,08	0,0058
12	0,85	0,75	0,01	0,00	0,09	0,0089							0,78	0,75	-0,04	0,00	0,03	0,0009
13	0,79	0,74	-0,04	0,00	0,05	0,0027	0,67	0,74	-0,07	0,01	-0,07	0,0053	0,80	0,74	-0,02	0,00	0,06	0,0038
14	0,82	0,73	-0,01	0,00	0,09	0,0089	0,60	0,73	-0,14	0,02	-0,13	0,0171	0,78	0,73	-0,04	0,00	0,05	0,0030
15	0,75	0,71	-0,09	0,01	0,03	0,0010												
16							0,59	0,70	-0,15	0,02	-0,11	0,0124						
17							0,55	0,69	-0,19	0,03	-0,14	0,0195	0,76	0,69	-0,06	0,00	0,07	0,0050
18													0,76	0,68	-0,06	0,00	0,08	0,0059
19	0,60	0,67	-0,23	0,05	-0,07	0,0044												
20							0,56	0,66	-0,18	0,03	-0,10	0,0091	0,71	0,66	-0,11	0,01	0,05	0,0025
21																		
	Media dati misurati			Σy <sup>2</sup>	ΣN*s <sup>2</sup> <sub>y,x</sub>		Media dati misurati			Σy <sup>2</sup>	ΣN*s <sup>2</sup> <sub>y,x</sub>		Media dati misurati			Σy <sup>2</sup>	ΣN*s <sup>2</sup> <sub>y,x</sub>	
	0,83			0,11	0,03		0,74			0,24	0,0832		0,82			0,06	0,0302	
	Devianza spiegata Σy <sup>2</sup> -ΣN*s <sup>2</sup> <sub>y,x</sub>						Devianza spiegata ΣN*s <sup>2</sup> <sub>y,x</sub>						Devianza spiegata Σy <sup>2</sup> -ΣN*s <sup>2</sup> <sub>y,x</sub>					
	Coeff. di determinazione r <sup>2</sup>						Coeff. di determinazione r <sup>2</sup>						Coeff. di determinazione r <sup>2</sup>					
	coeff.di correlazione √(r <sup>2</sup> )						coeff.di correlazione √(r <sup>2</sup> )						coeff.di correlazione √(r <sup>2</sup> )					
	coeff.di correlazione √(r <sup>2</sup> )%						coeff.di correazione √(r <sup>2</sup> )%						coeff.di correlazione √(r <sup>2</sup> )%					

## ***Allegato B-Elaborazioni costi/superficie***

Si riporta un esempio di foglio di calcolo per ricavare le curve costi e superfici necessarie in funzione della variabile tempo.

Nella elaborazione si è tenuto conto di un sistema di depurazione costituito da:

- 5000 abitanti equivalenti (AE).
- portata  $Q_s=4,5 \text{ dm}^3/(\text{ab} \cdot \text{d})$ .
- $\gamma_{ss}=1,25 \text{ Kg/dm}^3$
- Vita utile impianto 30 anni
- Costo superficie unitario  $200 \text{ € / m}^2$
- Costo ripristino unitario  $100 \text{ € / m}^2$

AE	Qs	Qs	Q <sub>stot</sub>	Q <sub>stot</sub>	t (tempo in vasca)	V <sub>tot</sub> =Q <sub>stot</sub> *t	V <sub>tot</sub> =Q <sub>stot</sub> *t	h <sub>c</sub> (h carico) 0≤h <sub>c</sub> ≤0,20	S <sub>tot</sub> =V <sub>tot</sub> /h <sub>c</sub>	S <sub>tot</sub> =V <sub>tot</sub> /h <sub>c</sub>	sup singola vasca	n° vasche	γ <sub>a</sub>	γ <sub>ss</sub>	U <sub>in</sub>	coeff eq W.C.	U <sub>fin</sub> estiva	U <sub>fin</sub> invernale	γ <sub>fango</sub>	t (tempo in vasca)
	dm <sup>3</sup> /(ab*d)	m <sup>3</sup> /(ab*d)	dm <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /d	d	dm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m	dm <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>		kg/dm <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>		a			kg/dm <sup>3</sup>	d
5000	4,5	0,0045	22500	22,5	0	0	0	0,15	0	0	110		1	1,25	0,99	0,069151	0,99	0,99	1,002	1
					1	22500	22,5	dm	15000	150		1,36				b	0,93	0,94		2
					2	45000	45	1,5	30000	300		2,73	Sup vasca	Sup vasca		1,077154	0,90	0,93		3
					3	67500	67,5		45000	450		4,09	dm <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>		c	0,88	0,92		4
					4	90000	90		60000	600		5,45	150	11000		0,920646	0,86	0,92		5
					5	112500	112,5		75000	750		6,82				d estivo	0,85	0,92		6
					6	135000	135		90000	900		8,18				0,017	0,83	0,92		7
					7	157500	157,5		105000	1050		9,55				d invernale	0,82	0,92		8
					8	180000	180		120000	1200		10,91				0,000488	0,80	0,92		9
					9	202500	202,5		135000	1350		12,27					0,79	0,92		10
					10	225000	225		150000	1500		13,64					0,78	0,92		11
					11	247500	247,5		165000	1650		15,00					0,76	0,92		12
					12	270000	270		180000	1800		16,36					0,75	0,92		13
					13	292500	292,5		195000	1950		17,73					0,74	0,91		14
					14	315000	315		210000	2100		19,09					0,73	0,91		15
					15	337500	337,5		225000	2250		20,45					0,71	0,91		16
					16	360000	360		240000	2400		21,82					0,70	0,91		17
					17	382500	382,5		255000	2550		23,18					0,69	0,91		18
					18	405000	405		270000	2700		24,55					0,68	0,91		19
					19	427500	427,5		285000	2850		25,91					0,67	0,91		20
					20	450000	450		300000	3000		27,27					0,66	0,91		21
					21	472500	472,5		315000	3150		28,64					0,64	0,91		22

V <sub>ini</sub>	V <sub>ini</sub>	P <sub>fango in</sub>	P <sub>fango fin estivo</sub>	P <sub>fango fin invernale</sub>	γ <sub>fango fin estivo</sub>	γ <sub>fango fin invernale</sub>	V <sub>f in estivo</sub>	V <sub>f in estivo</sub>	V <sub>f in invernale</sub>	V <sub>f in invernale</sub>	V <sub>w est</sub>	V <sub>w est</sub>	V <sub>w inv</sub>	V <sub>w inv</sub>	H <sub>f finale est</sub>	H <sub>f finale est</sub>	H <sub>f finale inv</sub>	H <sub>f finale inv</sub>
dm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	kg	kg	kg	kg/dm <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	dm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	dm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	dm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	dm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m	cm	m	cm
22500	22,50	22545,09	22096,53	22096,53	1,0020	1,0020	22051,44	22,05	22051,44	22,05	448,56	0,45	448,56	0,45	0,1470	14,7010	0,1470	14,7010
45000	45,00	45090,18	6322,02	8015,62	1,0145	1,0114	6231,84	6,23	7925,44	7,93	38768,16	38,77	37074,56	37,07	0,0208	2,0773	0,0264	2,6418
67500	67,50	67635,27	6623,80	9363,65	1,0208	1,0147	6488,53	6,49	9228,38	9,23	61011,47	61,01	58271,62	58,27	0,0144	1,4419	0,0205	2,0508
90000	90,00	90180,36	7367,78	11566,12	1,0251	1,0158	7187,42	7,19	11385,76	11,39	82812,58	82,81	78614,24	78,61	0,0120	1,1979	0,0190	1,8976
112500	112,50	112725,45	8112,86	14052,19	1,0286	1,0163	7887,41	7,89	13826,74	13,83	104612,59	104,61	98673,26	98,67	0,0105	1,0517	0,0184	1,8436
135000	135,00	135270,54	8780,46	16642,37	1,0318	1,0165	8509,92	8,51	16371,82	16,37	126490,08	126,49	118628,18	118,63	0,0095	0,9455	0,0182	1,8191
157500	157,50	157815,63	9364,71	19260,41	1,0349	1,0167	9049,08	9,05	18944,78	18,94	148450,92	148,45	138555,22	138,56	0,0086	0,8618	0,0180	1,8043
180000	180,00	180360,72	9877,01	21873,35	1,0379	1,0168	9516,29	9,52	21512,63	21,51	170483,71	170,48	158487,37	158,49	0,0079	0,7930	0,0179	1,7927
202500	202,50	202905,81	10330,81	24467,51	1,0409	1,0169	9925,00	9,92	24061,70	24,06	192575,00	192,58	178438,30	178,44	0,0074	0,7352	0,0178	1,7823
225000	225,00	225450,90	10737,70	27037,56	1,0438	1,0170	10286,80	10,29	26586,65	26,59	214713,20	214,71	198413,35	198,41	0,0069	0,6858	0,0177	1,7724
247500	247,50	247995,99	11106,86	29581,67	1,0467	1,0171	10610,86	10,61	29085,67	29,09	236889,14	236,89	218414,33	218,41	0,0064	0,6431	0,0176	1,7628
270000	270,00	270541,08	11445,40	32099,40	1,0496	1,0171	10904,31	10,90	31558,32	31,56	259095,69	259,10	238441,68	238,44	0,0061	0,6058	0,0175	1,7532
292500	292,50	293086,17	11758,83	34590,86	1,0525	1,0172	11172,66	11,17	34004,68	34,00	281327,34	281,33	258495,32	258,50	0,0057	0,5730	0,0174	1,7438
315000	315,00	315631,26	12051,47	37056,35	1,0553	1,0173	11420,21	11,42	36425,08	36,43	303579,79	303,58	278574,92	278,57	0,0054	0,5438	0,0173	1,7345
337500	337,50	338176,35	12326,71	39496,25	1,0581	1,0174	11650,36	11,65	38819,90	38,82	325849,64	325,85	298680,10	298,68	0,0052	0,5178	0,0173	1,7253
360000	360,00	360721,44	12587,28	41910,96	1,0608	1,0175	11865,83	11,87	41189,52	41,19	348134,17	348,13	318810,48	318,81	0,0049	0,4944	0,0172	1,7162
382500	382,50	383266,53	12835,37	44300,89	1,0635	1,0176	12068,83	12,07	43534,36	43,53	370431,17	370,43	338965,64	338,97	0,0047	0,4733	0,0171	1,7072
405000	405,00	405811,62	13072,78	46666,42	1,0662	1,0177	12261,16	12,26	45854,80	45,85	392738,84	392,74	359145,20	359,15	0,0045	0,4541	0,0170	1,6983
427500	427,50	428356,71	13301,00	49007,96	1,0688	1,0178	12444,28	12,44	48151,25	48,15	415055,72	415,06	379348,75	379,35	0,0044	0,4366	0,0169	1,6895
450000	450,00	450901,80	13521,25	51325,88	1,0715	1,0179	12619,45	12,62	50424,07	50,42	437380,55	437,38	399575,93	399,58	0,0042	0,4206	0,0168	1,6808
472500	472,50	473446,89	13734,58	53620,55	1,0740	1,0180	12787,69	12,79	52673,65	52,67	459712,31	459,71	419826,35	419,83	0,0041	0,4060	0,0167	1,6722
495000	495,00	495991,98	13941,87	55892,34	1,0766	1,0181	12949,88	12,95	54900,36	54,90	482050,12	482,05	440099,64	440,10	0,0039	0,3924	0,0166	1,6636

n° carichi est (ip 6 mesi est)	n° carichi inv (ip 6mesi inv)	cicli	Hacc est 6 mesi	Hacc inv 6mesi	H(anno)	H <sub>tot sponda</sub>	H <sub>tot sponda</sub>	Tsvuotamento 1m	T svuotamento1,5m	Vita utile opera	Ripris tini previs ti	costi superfici e unitari	Costi Superficie Tot	costi ripristin o unitari	Costi Ripristino Tot	Costi Tot
		giorni	m	m	m	m	m	anni	anni	anni	n°	€/m <sup>2</sup>	€	€/m <sup>2</sup>	€	€
180,00	180,00	1	26,46	26,46	52,92	1,00	1,50	0,02	0,03	30	1058	200	30000	100	15877037	15907037
90,00	90,00	2	1,87	2,38	4,25			0,2	0,4		85		60000		2548311	2608311
60,00	60,00	3	0,87	1,23	2,10			0,5	0,7		42		90000		1886029	1976029
45,00	45,00	4	0,54	0,85	1,39			0,7	1,1		28		120000		1671586	1791586
36,00	36,00	5	0,38	0,66	1,04			1,0	1,4		21		150000		1563419	1713419
30,00	30,00	6	0,28	0,55	0,83			1,2	1,8		17		180000		1492905	1672905
25,71	25,71	7	0,22	0,46	0,69			1,5	2,2		14		210000		1439685	1649685
22,50	22,50	8	0,18	0,40	0,58			1,7	2,6		12		240000		1396302	1636302
20,00	20,00	9	0,15	0,36	0,50			2,0	3,0		10		270000		1359468	1629468
18,00	18,00	10	0,12	0,32	0,44			2,3	3,4		9		300000		1327444	1627444
16,36	16,36	11	0,11	0,29	0,39			2,5	3,8		8		330000		1299159	1629159
15,00	15,00	12	0,09	0,26	0,35			2,8	4,2		7		360000		1273879	1633879
13,85	13,85	13	0,08	0,24	0,32			3,1	4,7		6		390000		1251065	1641065
12,86	12,86	14	0,07	0,22	0,29			3,4	5,1		6		420000		1230308	1650308
12,00	12,00	15	0,06	0,21	0,27			3,7	5,6		5		450000		1211286	1661286
11,25	11,25	16	0,06	0,19	0,25			4,0	6,0		5		480000		1193745	1673745
10,59	10,59	17	0,05	0,18	0,23			4,3	6,5		5		510000		1177479	1687479
10,00	10,00	18	0,05	0,17	0,22			4,6	7,0		4		540000		1162319	1702319
9,47	9,47	19	0,04	0,16	0,20			5,0	7,4		4		570000		1148126	1718126
9,00	9,00	20	0,04	0,15	0,19			5,3	7,9		4		600000		1134783	1734783
8,57	8,57	21	0,03	0,14	0,18			5,6	8,4		4		630000		1122194	1752194
8,18	8,18	22	0,03	0,14	0,17			5,9	8,9		3		660000		1110277	1770277

## Ringraziamenti

Voglio a questo punto ringraziare chi ha contribuito a rendere questo lavoro possibile, primi fra tutti il Prof. Ing. Renato Iannelli per avermi dato l'opportunità di occuparmi di questo progetto e l'ing. David Giraldi per il tempo concessomi.

I miei ringraziamenti devono essere poi estesi al Prof. Brunello Ceccanti, alla Prof.ssa Grazia Masciandaro, a tutte le disponibilissime ragazze del C.N.R., alla società ACQUE S.p.a ed ACQUE SERVIZI.

Un grazie sentito voglio dedicarlo all'Ing Rocco Sturchio non solo per la disponibilità e i buoni consigli ma anche, per il profondo affetto e l'infinita stima che mi lega a lui e per, avermi regalato, una di quelle "cartoline della memoria" che mi accompagneranno per il resto della vita: la mia prima stretta di mano da Ingegnere.

Voglio ringraziare tutto il fenomenale *Dipartimento di Idraulica*; le due dolcissime Cristine, i sempre disponibili Alessandro e Vincenzo, il mitico Fabrizio e tutti quelli che ci lavorano e che rendono il Dipartimento non un posto dove recarsi ma un luogo dove è piacevole andare.

La mia riconoscenza va anche alla mia famiglia:

- A *papà* per avermi insegnato cosa vuol dire non mollare mai neppure quando forse se ne avrebbe voglia.
- A *mamma* per essere la donna forte che spero di poter un giorno diventare.
- A *Daniel* il regalo più bello che i miei e la vita mi abbiano fatto.

Un grazie anche all'altra parte della mia famiglia, coloro che ti scegli e ti scelgono durante la tua esistenza:

- A *Michele* l'amico, il socio, il tutor, il confidente, la spina nel fianco e la spalla su cui appoggiarmi.
- A *Carla* e *Domenico* per aver condiviso con me il bene ed il male della vita.
- A *Cecilia* ed *Andrea* per tutte le ore piacevoli, le infinite confidenze e tutto l'affetto.

L'ultimo grazie desidero, non a caso, rivolgerlo a **Mirko** perché, se con esso si chiude un capitolo lungo e sofferto della mia esistenza sicuramente lui rappresenta il buono e il bello del mio presente e del mio futuro; il "*pensiero felice*" a cui ricorrere per stare bene.

Concedetemi ancora il ricordo di una ragazza che oggi avrebbe dovuto esserci e non c'è, un bacio Matteo ovunque tu sia il solo averti conosciuto è stato un dono.